農研機構

ISSN 1341-0148

農業機械化研究所研究報告

第37号

Technical Report
of
the Institute of Agricultural Machinery
(Nogyo Kikaika Kenkyusyo)
Saitama-city, Saitama, Japan
No.37 March 2009

平成21年3月

農機研報
Tech. Rep.,
Inst. of Agric.
Mach.
37 : 1-59
Mar. 2009

独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構
生物系特定産業技術研究支援センター
農 業 機 械 化 研 究 所
埼玉県さいたま市北区日進町1丁目

独立行政法人　農業・食品産業技術総合研究機構
生物系特定産業技術研究支援センター
農 業 機 械 化 研 究 所

Institute of Agricultural Machinery
Bio-oriented Technology Research Advancement Institution
National Agricultural and Food Research Organization

編集委員会
Editorial Committee

行 本　　修（委員長）	Osamu YUKUMOTO（Chief）
水野　隆史	Takashi MIZUNO
後藤　隆志	Takashi GOTO
杉山　隆夫	Takao SUGIYAMA
金光　幹雄	Mikio KANAMITSU
道宗　直昭	Naoaki DOSHU
森本　國夫	Kunio MORIMOTO
高橋　正光	Masamitsu TAKAHASHI
安食　惠治	Keiji AJIKI
落合　良治	Yoshiji OCHIAI

農業機械化研究所研究報告　第37号　（平成21年3月）

目　次

牧野英二・杉山隆夫・市川友彦・浜田健二・川中道夫

収量測定機能付きコンバインの開発

Technical Report of the Institute of Agricultural Machinery
(Nogyou Kikaika Kenkyusho)
No.37, March, 2009

Contents

Eiji MAKINO, Takao SUGIYAMA, Tomohiko ICHIKAWA,
Kenji HAMADA, Michio KAWANAKA

Development of Yield-monitoring Combine Harvester

収量測定機能付きコンバインの開発

牧野英二[*]・杉山隆夫[**]・市川友彦[***]・浜田健二[****]・川中道夫[*****]

2008-7-4　受理

*　生産システム研究部（現：基礎技術研究部）
**　生産システム研究部
***　前生産システム研究部
****　ヤンマー農機株式会社
*****　静岡製機株式会社

抄　録

穀物の収量や水分などの収穫情報を収穫作業と同時工程で測定・表示・記録し，収穫後に収量マップの作成が可能な収量測定機能付きコンバインを開発した。開発機は，荷重変換器（ロードセル）と傾斜センサを利用して穀粒タンク内の穀粒質量を測定する質量測定部，電気抵抗式（複粒式）の水分測定部，位置情報測定部，制御・表示部を有する自脱コンバインである。本研究では，それら構成部の要素技術開発と，収量データおよび水分データの時間遅れ補正方法の検討，傾斜補正および検量線などの収量測定システムの開発，GPSを使用しないマッピングシステムの開発を行った。実際の収穫作業下における測定精度試験の結果，水稲，小麦ともに試験結果の90％で質量測定の誤差が５％以内（最大でも８％以内）であり，水分測定の予測標準誤差（SEP）が水稲で0.98，小麦で1.28であった。また，質量マップ，水分マップ，水分15％換算した10ａ当たり収量マップの３つのマップを同時に解析することにより，施肥計画や土壌改善などのための情報取得を行えることを検証した。本研究の成果をもとに，日本型精密農業実証試験を経て，2009年春より「情報コンバイン」として販売される。

はじめに

水稲や小麦などの穀物収穫において，その年の出来高を示す収量や，収穫時の成熟度の指標になる水分などの収穫情報が重要であることは言うまでもない。これらの情報は，そこに至るまでの栽培管理の結果として，また次年度以降の栽培管理の指針として，従来から必要不可欠な情報として活用されてきた。しかし，収穫作業は作物条件や天候に左右され，どうしても能率優先になりやすく，作業しながら圃場ごとの収量や水分などに関する客観的な情報を得ることは難しく，作業者の記憶に頼らざるを得ないのが現実である。

ところが，近年の我が国の農業生産においては，従来からの経験的な情報だけでは十分といえない状況が

生じており，より正確な収穫情報が必要となっている。その背景としては，大区画水田の増加，高品質生産への取り組み，作業の最適化の必要性，請負作業の増加などによって，情報の利用価値が高まっていること，また，近年我が国でも注目されている精密農業技術の技術体系において，収量や水分などの作物情報が必要不可欠であることが挙げられ，より客観的で詳細な収穫情報の効率的な記録手段が要望されている。

欧米諸国では，収量センサや水分センサが普及しており，一般的に使用されている大型の普通コンバインに装備されている。我が国では，欧米の普通コンバインに比べて小型で構造が異なる自脱コンバインが広く普及していることから，欧米で普及しているセンサを直接利用することは困難である[1)2)3)]。欧米の普通コンバインに比べると自脱コンバインは収穫時の穀粒流量が少ないが，欧米で使用されている収量センサは低流量時の誤差が大きいことや，水稲で使用した場合に，衝撃板の磨耗が激しくセンサの耐久性が劣ることなどが指摘されている[2)]。また，我が国では，欧米に比べて高水分で穀物収穫をしなければならないこと，計測方法，機器の設置位置，圃場条件，対象作物が異なることなどの面においても，欧米の技術を直接，我が国に適用することは困難であると考えられる。

我が国においても，収穫情報測定に関して多くの研究開発が行われている。しかし，これらのほとんどが収穫した穀粒の質量測定に関する研究であり，収穫作業と同時に連続して水分測定を行うセンサの開発が欠落している。また，収量センサについても，一部が研究レベルで使用されてはいるものの，精度や取扱い性の点から実際の農家に利用される段階にまで達していないのが現状である。

生物系特定産業技術研究推進機構（現・生物系特定産業技術研究支援センター：生研センター）は，1998年度から「21世紀型農業機械等緊急開発事業」（略称：「21緊プロ」）で精密農業における機械・装置を開発する上で，関連する技術要素を「メッシュ毎の土壌や作物の状態等を的確かつ詳細に把握し（センシング），施肥・防除等を過不足なく効率的に行うこと（アプリケータ）」と整理し，「環境負荷の低減，収量の増加，品質の向上，生産コストの削減（効果）」を実現する精密農業関連の機械・装置の開発を行った[4)5)]。

本研究では，収穫した穀物の質量および水分などの収穫情報を収穫作業と同時工程で測定・表示・記録することができる収量測定機能付きコンバインの研究開発を，1995年度から2002年度までの8年間に亘り行った。1995年度から1996年度までの2年間で「多機能型グレンタンクの開発」，1997年度には「インテリジェンスコンバインの開発」という課題名で，海外機器の性能，圃場の収量ばらつきの調査などの基礎研究を実施した。さらに1998年度から2002年度までの5年間においては，前述した「21緊プロ」における精密農業の機械・装置の研究開発の一環として「収穫情報測定装置の開発」という課題名で開発研究を実施した[6)7)8)]。

第1章　序論

1．1　研究の背景

1．1．1　精密農業における本研究の位置付け

本研究において基礎研究に着手した1995年当時の我が国では，精密農業の研究手法が取り上げられて間もない頃であり，「圃場内の収量などのばらつきを記録し，小区画ごとに管理を行うことによって，肥料投入量の削減による環境負荷低減と収量の増大や品質の向上を目指す」といった精密農業初期の考え方が一般的であった。その後，精密農業の考え方は経営をも含む大きな概念へと発展しているため，まず精密農業とその研究史を総括することとする。

1）精密農業の概要と歴史

精密農業について，National Research Council（NRC：全米研究協議会）が包括的に定義している[9)]。要約すると「情報技術を駆使して作物生産に関わる多数の要因から，空間的にも時間的にも高精度のデータ

を取得・解析し，複雑な要因間の関係性を科学的に解明しながら意思決定を支援する営農戦略体系」ということであり，その営農戦略として様々な選択肢と可能性を含んでいる[10]。

澁澤は，精密農業の本質は，「圃場を含む農業生産現場で何が起こっているのかを事実に基づいて克明に記録し（多種多様なデータの収集），その事実の意味づけを行って状況あるいは文脈を構成する（情報の構造化），文脈をよく理解して，環境の保全と生産性・収益性をめざした合理的な処方箋による意思決定を行い（知識と知恵の活用），健全な農業経営体を持続させること」という精密農業の論理思考（precision thinking）にあると述べている[10]。

精密農業を実現するために，農業経営体に適した複数の技術を選択し，集約していくことが重要であり，その選択肢と可能性を広げるための技術開発が各分野で行われている。複数の分野にまたがる技術要素について，澁澤は圃場マッピング技術，意思決定支援システム，可変作業技術の３つの要素技術に分類している。圃場マッピング技術は「圃場で何が起こっているのかを正確に記録し，その特徴を理解するための技術」であり，「土壌マップと収量マップおよび雑草や病害虫のマップが最も重要なものである」と述べている。圃場マッピング技術は，「経験と平均値で観察していた圃場や作物が，空間的にも時間的にも変化するものであることを認める」ことで，「施肥設計をはじめとして，あらゆる農業管理作業のモデルや基準のあり方に大幅な変更を迫る可能性がある」と整理している[10]。

また，精密農業の研究史について，澁澤は以下の５つの世代を区分している[10]。

第１世代(1990 年以降)：小区画管理農法（site-specific crop management：SSCM）・・・圃場を細分化して局所的に施肥量などを最適化し，環境負荷軽減と生産性向上を同時に追及する段階。

第２世代（1990 年代中期以降）：局所可変作業農法（sensor-based SSCM）・・・肥料や農薬の可変作業機械が開発され，局所最適化の機械化作業体系が展望されるようになる。

第３世代（1996 年以降）：精密農業(precision agriculture, management technology, decision support system)・・・細分化した区画ごとの最適管理ではなく，圃場管理全体を最適化するための「意思決定」を重視する段階。なお，精密農業の呼称統一は，1996 年７月，米国ミネソタ州で開催された第３回精密農業国際会議で採択された。

第４世代（1990 年代後期以降）：精密農業米国モデル（cost-driven company-based precision agriculture）・・・個別技術の開発と普及だけでなく，農法体系全体の提案と農家の学習組織の結成が試みられるようになり登場した，規模拡大とコストダウンを導入契機とする農業ビジネスモデルである。精密農業導入の新たな投資に対して，コストダウンなどの収益メリットが期待できる経営規模は，1990 年代後半で 200ha，2005 年では 500ha 以上，数年後には 1000ha 以上であると試算されている。

第５世代（2000 年以降）：精密農業日本モデル（value-driven community-based precision agriculture）・・・「情報付き圃場」と「情報付き農産物」の２つの技術革新により，「食」市場ニーズの多様性と小規模農業の多品種少量高品位生産を結合する「食・農」ビジネスモデル。コストダウンによる収益メリットを追及する米国モデルと異なり，高付加価値化による農産物の柔軟な販売戦略が可能で，また小規模農業の存在価値も評価しているところに国際的な注目を集めている。

２）精密農業と本研究の関係

精密農業の技術要素である圃場マッピング技術は，精密農業の第１世代から第５世代まですべての世代で利用される重要な要素技術の１つである。収量マップは，土壌条件，病害虫の発生，施肥管理などが及ぼした影響を，収量変動という形で端的に示すものであり，土壌マップや生育量マップなどとともに精密農業に活用されることによって，大きな効果をもたらすと考えられる。そのため，収量や水分などの収穫情報を精度良く，効率的に測定できるシステム開発が必要とされている。

１．１．２　我が国の穀物生産における本研究の位置付け

我が国の穀物生産において，収量や水分などの収穫情報が数値化されることが必要とされる具体的な背景としては，以下のことが挙げられる。

1）大区画水田の増加

大区画水田では，地力むらや生育むらが比較的大きい傾向があり，収量や品質のばらつきの原因となっている。これらを改善するため，圃場内の収量や水分のばらつきの情報を利用した管理を行うことが必要となっている。統計によれば，全国における約1haの大区画水田の割合は，1994年で3.2%であったものが2002年には6.3%にまで増加しており[11) 12)]，精密農業による効率的な管理の必要性が増している。

2）高品質生産への取り組み

全国の米の産地では，産地としてのブランドを確立するために，消費ニーズに対応した高品質米生産に地域全体で取り組んでいる。そのためには，収量や水分などの収穫情報を地域全体で把握することが重要であり，これらの情報を容易に収集できるシステムが要望されている。

3）作業の最適化

収量や水分などの収穫情報は，1日の収穫作業時間を最大限にする観点や品質やロスの観点から，コンバインによる収穫作業の可否の判断や最適な機械条件設定を決定するための判断材料となる。しかし，これらについては作業者が経験的に判断しているのが現状であり，穀粒流量や水分などを収穫作業と同時に知ることができれば，より客観的な判断材料になると考えられる。また，共同作業の効率化においても，情報の利用価値が高まっている。例えば，カントリエレベータなどの共同乾燥施設では，施設の乾燥能力を超えないように荷受量の管理が行われている。施設によっては，品質管理の観点から荷受する収穫物の水分の上限を制限している場合もある。そのため，収穫時に乾燥前の収量と水分に関する，迅速で正確な情報が要望されている。

4）請負作業の増加

統計によれば，2003年の全国の水稲作付面積の16.3%が請負作業で行われており，その内訳は全作業請負が2.3%，収穫作業のみの部分作業受託が14.0%となっている[13)]。受託作業では作業料金算出基準となる作業時間や収量や水分などの作業報告が不可欠であり，より正確な情報取得が望まれている。さらに，作業報告だけにとどまらず，圃場ごとの収量，水分などの情報を的確に把握して，詳細な収穫情報を委託者に提供することも要望されている。

以上のように，生産現場において収量や水分などの収穫情報を効率的に測定する装置の開発が強く要望されている。

1．2　収量センサおよび水分センサの研究・技術開発動向

1．2．1　収量センサの開発動向

1）コンバイン制御用の穀粒流量センサ

コンバイン制御用の穀粒流量センサの研究は1960年代後期から始まっている。1969年にReedらが圧電素子を選別部後方に設置したロスモニタを報告した[14)の引用]。そのロスモニタは，メーカから市販され，現在も欧米で市販されている大型の普通コンバインには標準装備となっている機種がある。また，1972年のモスクワの国際展示会では，普通コンバインに取り付けたロスモニタにより脱穀選別損失を測定するだけでなく，同モニタを脱穀受け網下に取り付けることにより，収穫作業下で穀粒流量を連続測定する試みが紹介された[14)の引用]。また，PangとZoerbは，市販のロスモニタで使用されている圧電フィルムを脱穀受け網の下に取り付け，受け網から漏下してくる穀粒の一部をセンシングすることにより穀粒流量を推定するセンサを試作した[14)]。我が国では，松井らが，脱穀制御を目的として穀粒流量を把握するために，圧電素子を用いたカウント式センサを自脱コンバインの穀粒タンク内に取り付け，脱穀選別の制御を試みている[15) 16) 17)]。しかし，これらは，いずれもコンバインの機械条件に関する指標を得るために相対的な穀粒流量を計測することを目的とした研究開発であり，収量測定を行うに

は誤差が大きいことも報告されている。

2）バッチ測定式収量センサ

コンバインにおけるバッチ測定方式の収量測定システムを表 1-1（その１）に示す。欧米では，試験研究用や種子採取用に小型のプロットコンバイン（坪刈り用コンバイン）が使用されているが，かつてのプロットコンバインは，測定区画ごとに収穫して袋詰めされた穀粒を定置式の天秤で計量する方式であった。この作業負担を軽減するために，Christiansen は，プロットコンバインに穀粒容器を搭載し，その穀粒質量を停止状態で計測できる質量計を試作した [18]。また，Hooper は，穀粒排出作業時にアンローダから排出される穀粒を衝撃板に当て，その荷重をトルクゲージで計測して，質量流量を推定する収量センサを開発した。このセンサは、1978 年からコンバイン搭載用と施設用として市販された後，１年間で約 30 台が普及し，農家が圃場ごとの総収量や，圃場間の収量比較などの情報を経営に利用したと報告されている [19]。我が国では，建石らが，自脱コンバインの穀粒タンク内に，排出機構を持つ計測用ホッパを懸架し，その荷重をロードセルで測定して，収穫した穀粒質量をバッチ測定するプロットコンバインを試作した [20]。また，穀粒タンク内下方にロードセルを設置するバッチ測定式の質量センサも報告されている [21) 22]。これらは，いずれも高い測定精度を実現しているものの，コンバイン停止時や排出作業時に測定するバッチ測定式であり，効率的に測定を行うことができないため，用途は試験研究用に限られている。

3）普通コンバイン用の連続測定式収量センサの研究開発

普通コンバインにおける連続測定が可能な収量センサの研究は，精密農業が登場した 1990 年代に，様々な方式で多数行われている。連続測定ができる収量センサは，質量測定を行うものと容積測定を行うものに大別できる（表 1-1（その２～その４），図 1-1）。

質量測定を行うものには，計量式，衝撃式，光学式などが挙げられる。衝撃式では，1985 年に DeBaerdemaeker らが，90 度に曲がった長いＬ字状になった直径 12cm の管にロードセルを付けて，穀粒が当たった時の荷重変化により収穫質量の流量測定を行う装置を開発した [23)の引用]。その後，1995 年には形状を曲板状に改良して，現在，米国で市販されている衝撃式の流量センサの原形とも言える装置を開発した。また，板状の衝撃板の代わりに棒状のセンサを利用したものや，ポテンショメータで衝撃板の移動量を測定する方式も市販されている [24) 25]。光学式では，Diekhans が，一番揚穀エレベータの頂上付近に光源と受光センサを取り付け，エレベータ板に堆積した穀粒により光が遮断される時間から穀粒容積流量を測定した [26)の引用]。また，Pfeiffer らが，一番揚穀エレベータ排出口にフォトダイオードと光源を取り付け，光の透過量から穀粒質量を推定するセンサを開発した [27]。このほか，質量測定を行う収量センサには，一番揚穀エレベータから穀粒タンクに放擲される穀粒にガンマ線を照射し，その減衰比によって穀粒質量流量を測定する方式が欧州で市販されているが，米国などでは規制の対象となり使用できない [28) 29]。また，一番揚穀エレベータの駆動力を測定する方式 [30) 31]や，荷重を測定する穀粒流量測定用のオーガや穀粒タンク内に吊り下げた小型容器の質量をロードセルで測定する方式 [32]，一番揚穀エレベータの経路を逆三角形にし，その上辺部分を片持ち支持とし，その荷重をロードセルで測定する流量測定式 [33]などの研究が行われた。さらに，容積測定を行うものには，光電センサや赤外センサを利用して一番揚穀のスラットコンベア上の穀粒堆積容量を測定する光学式 [25) 34]や一番揚穀エレベータから穀粒タンクへ排出される穀物を，容器で受け止めて羽根車でかき出し，その回数により穀粒容積流量を測定する方式 [28) 29]などが市販化された。

4）普通コンバイン用の連続測定式収量センサの課題

以上のように，普通コンバイン用の連続測定が可能な収量センサの幾つかの方式が市販化され，1990 年代初期から欧米で普及が始まり，米国では 2000 年の普及台数が３万台を超えたと推定されている [35]。そして，収量センサの普及とともに，測定誤差の要因解析が行われた。Blackmore と Marchall は，収量セン

表1-1（その1）収量センサの分類

測定方式	センサ方式	内容	コンバイン等	参考文献	備考
バッチ測定式 穀粒タンク内にある容器で、排出前あるいは排出時に計量する方式。収穫作業下での連続測定はできない。	衝撃式（質量）	衝撃板をアンローダ出口に設置し、トルクゲージで衝撃荷重を測定	普通	Hooper(1979)[19]	市販化
	計量式（質量）	ロードセルを穀粒タンク内に設置し、穀粒タンク内の穀粒からの荷重を直接測定	自脱	杉山と牧野ら（1998）[21]，帖佐ら(2001)[22]	
		ロードセルにより、穀粒タンク内に懸架した計測用ホッパの質量測定	自脱	建石ら(2002)[20]	プロットコンバイン（試験研究用の坪刈り用コンバイン）
		水圧計による穀粒タンク内の小型容器の質量測定	普通	Christiansen(1975)[18]	
		ロードセルにより計量ワゴンの中に設置した小型容器の質量測定（コンバインから排出された時点で計量する。米国では従来から利用されている計量方法）	計量ワゴン	Kuharら(1997)[131]，下保ら(2002)[132]	通称：Weigh Bin Wagon
	光学式（質量）	光電センサをアンローダ出口に設置し、排出時間を測定	普通	建石ら(2006)[68]	
	その他（質量）	電極をアンローダ筒に設置し、静電容量を測定	普通	BorgeltとSudduth(1992)[28]の引用	

表 1-1（その 2）収量センサの分類

測定方式	センサ方式	内容	コンバイン等	参考文献	備考
連続測定式(1/3) 収穫作業下で、連続的に質量あるいは容積などを測定する。	計量式(質量)	ロードセルにより穀粒タンク内の小型容器の質量測定	普通	WagnerとSchrock(1989)[32] KrumpelmanとSudduth(2000)[115]	Weigh Bin Wagon (表1-1（その1）を参照) コンバインに搭載
		ロードセルにより穀粒タンク内に片持ち支持した穀粒搬送オーガの支持荷重測定	普通	WagnerとSchurock(1986)[32] (1989)[116]	通称: Pivot Auga Flow Sensor
		ロードセルにより一番揚穀エレベータの支持荷重を測定	普通	Howardら(1993)[33], Pringleら(1993)[117]	通称: Triangle Paddle Elevator
		ロードセルにより穀粒タンク4点を支持し、荷重を測定	-	杉山と牧野ら(1996)[118]	基礎試験装置
		コンバインの穀粒タンクなどが載るシャーシを支持する左右２本の油圧シリンダの油圧圧力を測定	自脱	牧野ら(2001)[58], 杉山と牧野ら(2001)[59]	
		タンクの片側をロードセルで支持し、計測した荷重からタンク内の穀粒質量を測定	自脱	牧野ら(2007)[6][7][8], (本報告)	
	衝撃式(質量)	圧電素子により穀粒数カウント	普通	PangとZoerb(1990)[14]の引用	ロスモニタを収量計測に利用
			自脱	松井ら(2000, 2001)[15][16], Matsui(2002)[17]	脱穀制御用
		衝撃板を一番揚穀出口付近に設置し、ロードセルにより衝撃荷重測定	普通	Birrellら(1996)[37], Perez-MunozとColvin(1996)[39] Shearer(1997)[23], DeBaerdemaekar(1985)[23]の引用 KettleとPeterson(1998)[24], Kormannら(1998)[25] Al-MahasnehとColvin(2000)[50], Jasaら(2000)[38] HemmingとChaplin(2005)[93], Minzanら(2005)[119]	Yield Monitor 2000(AgLeader社) Case IH社製の収量センサ Field Star(AGCO Massey Ferguson社)
			自脱	庄司と川村(1998)[55][120], 庄司ら(2000)[71] Shojiら(2002)[62], 建石ら(1999)[121] 飯田ら(2002, 2003)[57][122][123], Iidaら(2005)[124]	

表 1-1（その 3）収量センサの分類

測定方式	センサ方式	内容	コンバイン等	参考文献	備考
連続測定式(2/3) 収穫作業下で、連続的に質量あるいは容積などを測定する。	衝撃式（質量） ※前頁からの続き	衝撃板を一番揚穀エレベータ出口付近に設置し、ポテンショメータによる変位量測定	普通	BorgeltとSudduth(1992)[28]の引用 Auernhammerら(1993)[29]，Sheare(1997)[23] KettleとPeterson(1998)[24]，Kormannら(1998)[25] Burksら(2000,2001)[42) 99]，Jasaら(2000)[38]	Green Star(Deere & CO.社)
		ロードセルにより一番揚穀エレベータからタンク内の円錐状のロートへの落下衝撃荷重を測定	普通	BorgeltとSudduth(1992)[28]の引用	
		衝撃板に一定高さから穀粒を落下させて、２方向力量計による荷重測定	-	小林ら(1988)[75]，三輪ら(1990)[125]	基礎試験装置
		ひずみゲージを貼った板状のセンサを一番揚穀出口付近に設置し、衝撃荷重測定	普通	Kormannら(1998)[25]	Grain Track(MicroTrack社)
			自脱	帖佐と小林(1999)[72) 85]，帖佐ら(2000)[126] 李ら(1999,2000)[56) 63) 127) 128]，Lee(2001)[64]	
	光学式（質量）	光電センサを一番揚穀出口付近に設置、光透過量を測定	普通	Pfeifferら(1993)[27]	
			自脱	Chosaら(2000)[54]	
		一番揚穀エレベータから穀粒タンクに排出される穀粒をシュートに受けて光学式センサで、穀粒層の高さを測定	普通	建石ら(2005)[129]	
	その他（質量）	一番揚穀エレベータを駆動する電磁モータの駆動電力を測定	普通	Petersonら(1989)[30]	
		ガンマ線を一番揚穀エレベータ出口付近に設置し、穀粒に照射したときの減衰量測定	普通	BorgeltとSudduth(1992)[28]の引用 Auernhammerら(1993)[29]，Kormannら(1998)[25]	Flow Control(AGCO Massey Ferguson社) 法規制があり米国などでは使用不可
		穀粒タンク下部の掃除用フタがタンク内の穀粒重量によって開こうとする力をロードセルにより測定	自脱	牧野ら(2001)[58]，杉山と牧野ら(2001)[59]	

表 1-1（その 4）収量センサの分類

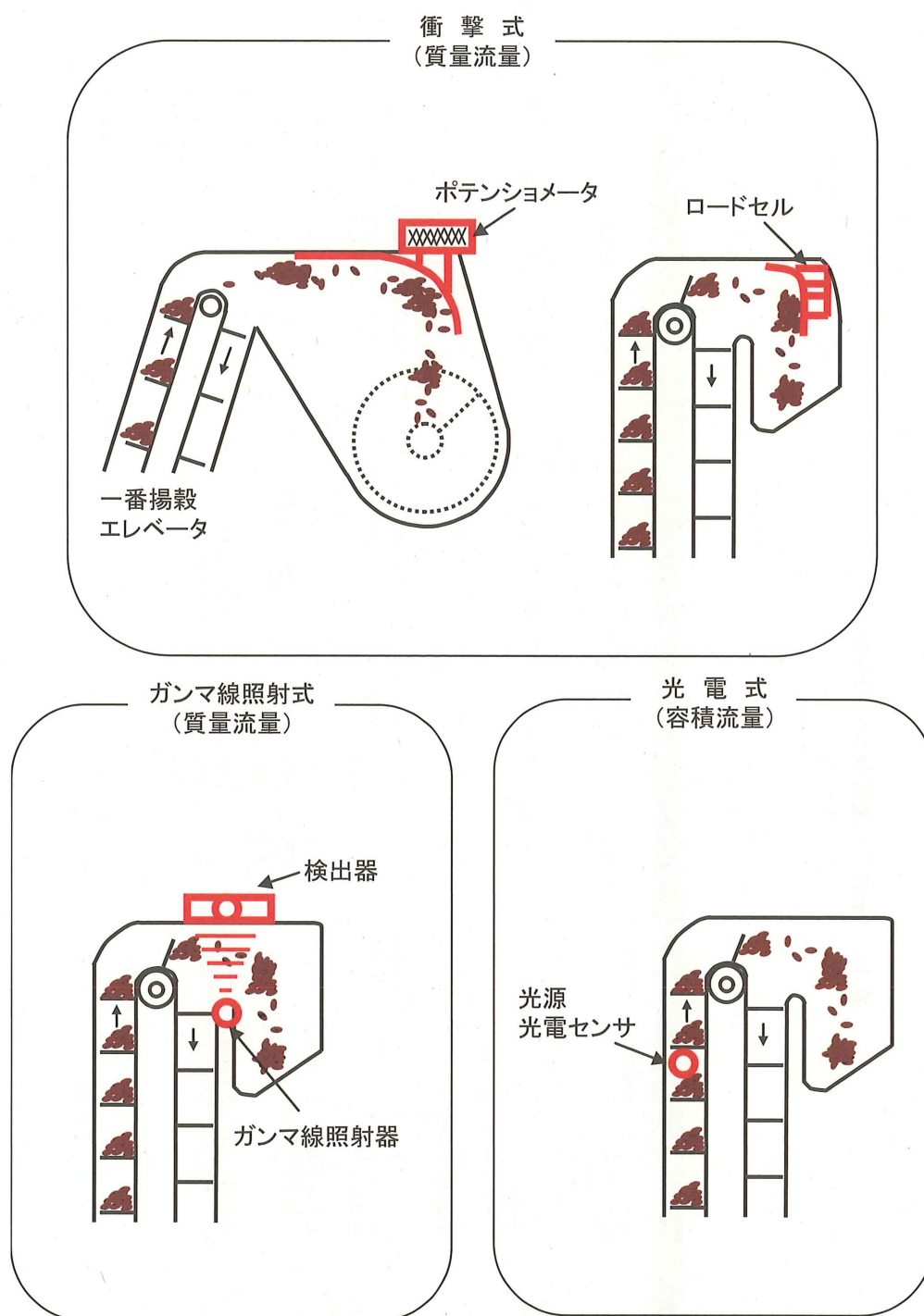
測定方式	センサ方式	内容	コンバイン等	参考文献	備考
連続測定式(3/3) 収穫作業下で、連続的に質量あるいは容積などを測定する。	光学式 (容積)	光電センサを一番揚穀エレベータ頂上付近に設置、スラットコンベア上の穀粒堆積量を測定	普通	Reitz(1996)[26]の引用，Kormannら(1998)[25] 原ら(2000)[130]	QuantimeterⅡ(Class社)
		数個のLEDセンサにより穀粒タンク内の 堆積量を測定	普通	BorgeltとSudduth(1992)[28]の引用	Bin Watch(Rodvelt Agritronics社) 簡易測定用として市販
		赤外センサを一番揚穀エレベータ頂上付近に設置、スラットコンベア上の穀粒堆積量を測定	普通	SanaeiとYule(1996)[34]，Kormannら(1998)[25]	Cares2(RDS社)
	その他 (容積)	回転する羽根車式のセンサを一番揚穀レベータ出口付近に設置し、羽根車回転数を測定	普通	Baeら(1987)[46]，Searcyら(1989)[47] Stottら(1993)[48]，Auernhammerら(1993)[29] Birrellら(1996)[37]	Claydon Yield-o-meter (Shelbourne Reynolds社製造で Class社が販売)
		超音波距離計により穀粒タンク内の穀粒堆積量を測定	普通	BorgeltとSudduth(1992)[28]の引用	
			自脱	杉山と牧野ら(1999)[60]，飯田ら(2006)[61]	
	ハイブリッド式 (質量)	連続測定式のセンサを補正するためにバッチ測定式のセンサを併用する	普通	建石ら(2006)[68]	
			自脱	Chosaら(2001)[65]，帖佐ら(2002, 2004)[66) 67] 帖佐(2004)[3]，建石ら(2006)[68] 李ら(2006)[69]	

参考：KormannとAuernhammer (1998)[25)], Kuhar (1997)[131)]

図 1-1 欧米で市販されている収量センサ（普通コンバイン用）

サの誤差を刈幅，時間遅れ，GPS エラー，穀粒流量の急変，コンバインの収穫ロス，センサの精度，較正の６つの要因に分類した[36]。また，Birrell らは，収量センサの潜在的な誤差要因として，位置情報，流量，刈幅，時間遅れ，水分測定誤差，較正誤差，急停止や急発進などの操作方法に起因する誤差があると分類した[37]。Reitz と Kutzbach は，収量マップを正確に作成するためには，穀粒水分，普通コンバインの真の刈幅，コンバイン内における穀粒の動きなどの情報が必要であるとした[26]。収量センサの誤差要因として多数報告されたものを整理すると，①検量線の較正方法，②低流量時の測定精度低下，③データの欠測値や異常値，④時間遅れ，⑤センサの耐久性や汚れ，⑥コンバインの機体傾斜，⑦穀粒性状，⑧小区画での測定，⑨刈幅変動が挙げられる。

ａ）検量線の較正方法

Kettle と Peterson が，市販の２種類の衝撃式の収量センサの較正方法による精度の違いを詳細に調査した結果，較正点を多くした方が精度が向上し，較正時と異なる流量で測定すると誤差が非常に大きくなることを明らかにした[24]。Jasa らは，ロードセルを利用した市販の衝撃式収量センサ３種類を供試して，メーカで推奨する「流量が異なる複数点で較正」した場合には誤差が比較的小さかったが，「１点のみの流量で較正」した場合は誤差が極端に大きくなることを明らかにした[38]。

ｂ）低流量時の測定精度低下

市販の２種類の衝撃式収量センサについて，Perez-Munoz と Colvin は，3.8t/ha 以下の低収量圃場での収穫時には，実収量との誤差が大きいことを明らかにした[39]。Kettle と Peterson は，較正時の流量の 1/3 で測定すると誤差が非常に大きいことを明らかにした[24]。Kormann らによる室内精度試験の結果，衝撃式の収量センサ３種類と，ガンマ線を利用した収量センサ，光電センサによる容量式の収量センサのいずれもが，2.8kg/s（10ｔ/h）の低流量時に誤差が大きく，３～７％の誤差が発生した[25]。Colvin と Arslan は，0.5kg/s（約２t/h）の低流量時の場合，市販の衝撃式センサでは検出不能であった事例を紹介している[40]。Chaplin らは，穀粒流量１kg/s（約４t/h）以下の低流量時に，市販の衝撃式センサの誤差が±60％に上ると報告している[31]。また，Grisso らは，通常の作業速度より 20～30％減速した場合と 20～30％増速した場合の測定誤差を調査し，コンバインの作業速度変動による穀粒流量が測定精度に大きな影響を与えると報告した[41]。Burks らは，収量センサの室内精度評価を行い，米国での普通コンバインの収穫作業における通常の穀粒流量の範囲を 4.2 ～16.9kg/s（15.1～60.8t/h）と仮定し，これを超える場合や下回る場合は誤差が大きかったと報告している[42]。

ｃ）データの欠測値や異常値

特にGPS 情報の取得エラーや圃場境界の誤認などによるデータ欠測値が多いため，Shearer らは，収穫後に収量マップを作成する際，収量データの異常値除外や補間などを行うデータフィルタを開発した[23]。Beck らは，収穫後の収量マップ作成において，収量センサのデータの欠測値や異常値を削除できるフィルタを開発した[43]。O'Neal らは，データ欠測値や異常値による誤差要因を詳細に解析し，測定データから真の収量を推定するための補正方法を提案し，他の研究者が提案している方法との比較を行った。補正後の収量測定値と計量した実収量との誤差は±10％程度であったが，最大で±30％のこともあり，さらに解決すべき課題が多いことを示した[44]。

ｄ）時間遅れ

Wagner と Schrock が時間遅れを調査した結果，14～15 秒であった[32]。Sanaei と Yule は，着色した水分 16.8％の大麦が，作業速度 0.7m/s で刈り取られてからセンサ位置に到達するまでの時間分布を調べ，最も多かったのは 12 秒から 15 秒の間であり，時間分布の広がりは 8.7 秒であったことを報告した[34]。また，Snyder と Britt が市販の収量センサの時間遅れを調査した結果は 12 秒であり，取扱説明書に記述されている８秒に対し，４秒の差があったことを明らかにした[45]。Colvin と Arslan は，収量マップの誤差要因となる時間遅れについて，収穫前のトウモロコシを約３m（10ft）青色に着色して，作業速度 0.45m/s でコンバイン収穫した時，着色した地点から穀粒タンクへ到達した地点までの距離を，着色した穀粒の分布により調査した。その分布は 15mをピークにして６mから

30mまで広がっており，時間にすると33秒をピークに13秒から67秒まで分布していた。その要因については，コンバインヘッダの横方向刈取り位置（中央と両端）の違い，脱穀される位置，二番還元などであると考察した[40]。これらの時間遅れを補正するモデル式作成に，Baeらや Searcyらが取り組んでおり，収量センサの精度向上を検討している[46) 47]。しかし一方で，一律に時間遅れを補正するのが良いとの報告もある。Birrellらは，時間遅れ補正について，複数のパラメータによる補正式よりも，一律に時間遅れを補正する補正式の方が概してノイズの影響を受けにくく，平滑化処理を最小化できるため良いと結論し[37]，Stottらも補正方法を比較した結果，一律の時間遅れ補正が良いという結果を得ている[48]。

e）センサの耐久性や汚れ

Kormannらは，光学式センサの受光部や衝撃式センサの板の汚れなどの掃除が必要なことなどを精度上の課題として指摘した[25]。また，後藤と牧野らの米国調査において，衝撃式収量センサの衝撃板に大豆カスが付着するために定期的な清掃が必要なことや，稲の測定時に衝撃板が磨耗するなどの理由で耐久性に課題があることなどが報告されている[2]。

f）コンバインの機体傾斜

傾斜地での収穫作業や発進停止時のコンバインの機体傾斜によって，衝撃式収量センサの誤差が大きくなることが明らかにされている[24) 26)の引用 39) 41]。同様に，光電センサや赤外センサを用いた容量式収量センサも，コンバイン機体傾斜の影響を顕著に受けたと報告されている[23)の引用 25) 34]。

g）穀粒性状

容積式収量センサは，質量換算する時に収穫した穀粒の密度の影響を受ける[25) 37]。同様に，衝撃式収量センサも穀粒密度の影響を強く受けることが報告されている。Grissoらは，衝撃式センサは品種による密度の差が測定精度に影響を与えることを明らかにした[41]。このように，衝撃式センサ，容量式センサともに，穀粒の水分や密度などの性状の影響を強く受ける。

h）小区画圃場での測定

Sudduthは，米国で市販されている衝撃式収量センサにおいて，小区画の収量測定やリアルタイム表示値の誤差が大きいことを報告しており[49]，Al-MahasnehとColvinが行った試験では，衝撃式収量センサの測定値と実際の収量との相関は，収穫距離（測定区間）が長くなるほど高くなり，18mを収穫した時の決定係数が $r^2=0.75$ であるのに対し，95mを収穫した時は $r^2=0.98$ であった[50]。

i）刈幅変動

普通コンバインでは刈幅が変動する場合が少なくない。特に条播栽培でない作物の場合は刈幅の変動が顕著となり，これが収量マップなどの作成の際に誤差の要因となる。Beckらは，普通コンバインでは変動する刈幅を測定できないため，特に不定形圃場の場合に収量を低く測定してしまうと指摘した[43]。またJasaらが，収量センサを利用している13人の農家によるトウモロコシの収穫作業を調査した結果，いずれも設定刈幅よりも小さい幅で収穫作業をしていることが明らかになった[38]。それらの問題を解決するため，ReitzとKutzbachは，収量マップを正確にするためには，真の刈幅情報が必要だとして，超音波距離センサによる刈幅測定を行ったが，作物境界は非常に複雑であるためノイズが大きかったと報告している[26]。一方，Sudduthらは，超音波センサは取扱いが容易であるうえ，小麦収穫，大豆収穫で誤差約20cmの実用的な精度を得たと報告している[51]。また，GPSによる位置情報を利用した刈幅の測定も試みられている[51) 52) 53]。

5）自脱コンバイン用の連続測定式収量センサの研究開発

我が国の水稲および麦類の収穫で広く利用されている自脱コンバインは，①難脱粒性の短粒種の水稲でもロスの発生が少なく，選別精度が高い，②比較的高水分での収穫が可能である，③小型であり小区画圃場での小回りが利くなどの特徴を持ち，当然のことながら我が国における水稲および麦類の収穫に適応した高い性能を有している。しかし，前述したように普通コンバイン用の収量センサは，検量線の較正方法，低流量時の測定誤差の大きさ，センサの耐久性や汚れ，対象とする穀粒性状の違いなどの様々な要因から，我が国の水稲および麦類の収穫で高い性能を有する自脱コン

バインに適用することが困難であると判断される[2) 21) 54)]。

そのため，国内では自脱コンバイン用の収量センサの研究が多く行われている。その方式には，ロードセルを利用した衝撃式の質量センサ[55) 56) 57)]，光電センサを用いた光学式の質量センサ[54)]，穀粒タンクを支える左右２本の油圧シリンダの油圧圧力を測定する計量式の質量センサ[58) 59)]，タンク内の穀粒質量によって穀粒タンク下部のフタが開こうとする力を小型ロードセルにより測定する質量センサ[58) 59)]，超音波変位センサを用いた容積センサ[60) 61)]などがある（表 1-1，図 1-2）。

６）自脱コンバイン用の連続測定式収量センサの課題

以上のように連続測定が可能な自脱コンバイン用の収量センサが研究開発されているが，いずれの方式も精度を向上させるために，加速度計によって振動の影響を除去したり[62)]，ノイズを消去するために補正用センサを併設したり[63) 64)]，振動の影響を除去するためデジタルフィルタを使用したり[57)]，連続測定式のセンサを補正するためにバッチ測定式のセンサを併用するハイブリット方式を採用する[3) 65) 66) 67) 68) 69)]といったことが必要であり，複雑なシステム構成となっているものが多い。また，前述した欧米の収量センサにおいて指摘されている誤差要因についての課題だけでなく，自脱コンバインに収量センサを搭載することによる独自の課題も多く，それらについて，十分に検証あるいは解決されていないのが現状である。それらの課題を整理すると以下のようになる。

ａ）センサの設置スペース

欧米で利用されている普通コンバインに比べて小型の自脱コンバインは，容積が小さい穀粒タンクの空間を効率的に利用しなくてはならないため，一番揚穀オーガ上部の拡散板によって穀粒を穀粒タンク内に拡散し，穀粒が偏って堆積しないようになっている。自脱コンバイン用に研究開発された衝撃式などの収量センサを穀粒タンク内に設置することは，穀粒タンクとして利用できる容積を減らすだけでなく穀粒堆積状態に偏りをもたらすことになるため，穀粒タンクの容積効率をさらに低下させることになる。さらに，衝撃板のタンク内への設置位置によっては一番揚穀オーガの搬送抵抗となり，動力的に余裕のない高速作業時や高水分収穫時において，一番揚穀オーガが詰まる原因となることが懸念される。

ｂ）センシング方式

欧米の普通コンバインでは，脱穀選別後の穀粒を穀粒タンクに垂直方向に搬送する一番揚穀部に，スラットコンベアやバケットコンベアが採用されている。そのため，収穫された穀粒は間欠的にある程度まとまって穀粒タンクに搬送され，衝撃式センサや光電センサでの測定が比較的容易である。一方，自脱コンバインの一番揚穀部にはスクリュオーガが採用されている。搬送される穀粒は連続的に変動しながら穀粒タンクに拡散して排出されるため，それらすべてを衝撃板や光電センサなどで検出することは困難であり，一部の穀粒を検出することによって推定せざるを得ない。さらに，欧米の収量測定システムでは精度向上の点から，穀粒搬送速度を一定にするために一番揚穀コンベアの回転速度を制御（あるいは測定）する必要があるが，自脱コンバインの揚穀方式として採用されているスクリュオーガに，この原理を適用することは極めて困難である。帖佐らは，穀粒タンク内に設置する収量センサなどの最適な設置場所を検討するために，穀粒タンクにおける穀粒の拡散状態を調査した[70)]。その結果，穀粒水分の違いなどで密度が異なると，センサを設置するのに適すると考えられる穀粒が集中する範囲が変化することを明らかにした。それらを考慮すると，質量センサを一番揚穀出口あるいはタンク内に取り付けてセンシングすることは大きな誤差の原因となることが予想される。

ｃ）検量線の較正方法

米国で普及している収量センサは，シーズン開始時に流量別に数点の較正を行う必要があり，必要に応じて収穫シーズン中にも較正を行うことが推奨されている。しかし，米国に比較して作付面積が小さく，コンバインの稼動時間が短い我が国おいては，米国と同じようにセンサ較正に多くの時間や面積を費やすことが難しいため，較正作業が簡便となるようなセンサ開発が必要である。ところが，自脱コンバイン用の収量セ

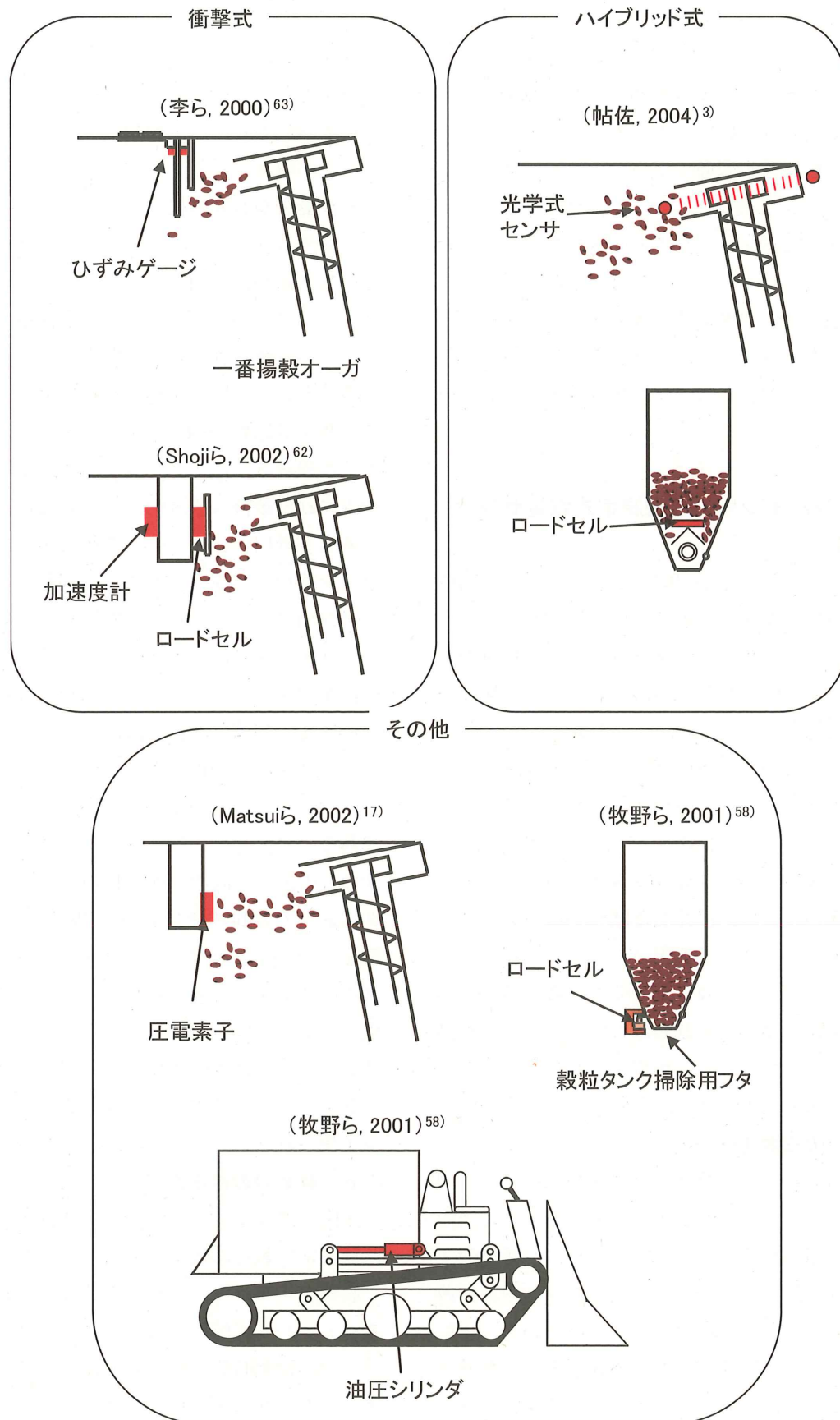



図 1-2 我が国における収量センサの研究例（自脱コンバイン用）

b）我が国での研究開発

一方、我が国の水稲や小麦用の連続水分センサは，高周波静電容量式水分計[82]や，電気抵抗式の単粒水分計が施設用として研究開発された[83]。その後，自脱コンバインに搭載する水分センサとして，まず，米国で市販の静電容量式水分計や電気抵抗式水分計を適用するための研究が行われ，低流量あるいは枝梗付着粒が多い場合などに充填密度が低下すること，表面水の影響などによって誤差が大きくなることが明らかになった[84) 85]。加藤は，コンバイン搭載用水分センサとして応用することを前提に，高周波静電容量式水分センサの測定精度の向上をはかるため，電極の大きさや形状，測定周波数などの機器条件，穀物水分（特に30%w.b.以上の高水分域），穀物量，穀物密度などの諸条件が，計測ホッパ内に充填した穀物のバルクとしての電気特性や測定精度に与える影響について体系的な基礎研究を行った[86) 87]。さらに，加藤らは簡易にかさ密度補正が行える電極を試作し，高周波を利用することにより 32% w.b.程度の高水分域の籾でも実用レベルの精度で計測できる静電容量式の水分計を開発した[88]。しかしながら，質量補正を行う必要があるなど，自脱コンバインに搭載して実用的な精度を得るためには課題が残された。そして，現在までに自脱コンバインでの連続測定に利用できる測定精度の高い水分センサは開発されていない。また一方，帖佐は，収量センサで測定した収量を水分換算するための水分測定については，圃場ごとの平均水分測定のほか，精度を高める方法として穀粒タンクからの排出時や乾燥施設張り込み時の水分測定を提案し，その方法を利用すれば，水分測定方法だけに起因する質量測定誤差は，穀粒水分が 20～25%の範囲では５%未満で，帖佐が開発した収量センサの誤差を単純加算しても 10%程度であると試算した[3]。しかし，水分 25%以上の高水分穀粒や 20%未満の乾燥気味の穀粒の場合は，さらに上回る誤差になると予想され，それらが実用上許容できる誤差かどうかは十分に検証されていない。

2）水分センサの課題

自脱コンバインに搭載する水分センサの課題としては，①電気抵抗式水分センサの利用，②穀粒性状への対応，③設置スペース，④耐久性，⑤時間遅れ補正が挙げられる。

a）電気抵抗式の利用

我が国で米麦を中心に普及している水分計は電気抵抗式である。下原によると，その長所は，簡便で迅速性もありコストが最も安く，精度が安定しており，保守点検が簡単なことである。そのため，現在市販されている循環型穀物乾燥機の米麦用自動水分計のほとんどで，ロール電極を有する電気抵抗式水分センサが採用されている。一方，米国では，非破壊であることが最大の長所であり，小粒穀物から大豆やトウモロコシなどの大粒穀物にまで適用できる静電容量式水分計が一般的に使用されている。そうした背景から，米国などで市販されているコンバイン搭載の水分センサは，すべて静電容量式となっている。静電容量式の短所は，測定サンプルの質量やかさ密度の影響を強く受けること，精度確認や調整が困難であること，穀温の影響と温度センサの応答に課題があること，穀物１粒内の水分勾配の影響を強く受けるため収穫直後の表面水に弱いこと，電気抵抗式との精度特性が異なり日本に馴染まないこと，コストが割高なことなどである。現在，静電容量式水分センサは我が国では大豆測定などに利用されているのみであり，水稲や麦類の水分測定に利用するには課題が多い[89]。そのため，我が国で広く普及している電気抵抗式水分センサを利用した自脱コンバイン用の水分センサの開発が必要と考えられる。

b）穀粒性状への対応

加藤は，我が国のコンバイン収穫工程での穀粒の特徴について，①高水分である，②粒単粒での水分のばらつきが極めて大きい，③枝梗，藁屑などの混入割合が高い，④かさ密度が不安定である，⑤表面水が付着している場合があると整理した[86]。米国で市販されている静電容量式水分センサは，収穫時の穀粒水分が15%を下回り，かさ密度も比較的安定しているトウモロコシ，小麦，大豆を対象としており，穀粒水分が25%以上の場合は誤差が 10%を超えるとの報告もある[2]。そのため我が国独自の水分センサの研究開発が必要である。

c）センサの設置スペース

欧米で市販されている主な水分センサは，精度上の

理由から測定部での穀物の充填密度を安定させるために，穀物搬送経路上の揚穀オーガに切込みを入れてセンサ部を挿入する方式や別流路を設けて水分センサを設置する方式が主流となっているが，我が国で普及しているコンバインは欧米と比較して小型であるため，別流路を設けるための空間的余裕がなく，また，揚穀オーガに動力的余裕がないためオーガ内にセンサ部を挿入することも難しい。

ｄ）耐久性

欧米の水分センサは，水稲収穫時に水分センサの電極の消耗が激しいことが報告されている [2]。耐久性の面からも，水稲・麦類を対象にしている自脱コンバイン用としては，独自の水分センサ開発が必要である。

ｅ）時間遅れ補正

欧米で市販の水分センサは，収量センサと同様に一律の時間遅れ補正を採用している。時間遅れ補正の研究は多いものの，いずれも収量センサを対象にしており，これまでに水分センサにおける時間遅れ補正の研究は報告されていない。

１．２．３　課題の整理

前項までに述べたように，自脱コンバインの収量測定システムには多くの課題が残されている。それらの課題を整理すると，収量センサについては，①設置スペース，②センシング，③検量線の較正，④低流量時の測定，⑤データの欠測値や異常値，⑥時間遅れ補正，⑦耐久性，⑧コンバインの機体傾斜，⑨穀粒性状，⑩小区画圃場の課題が，また，水分センサについては，①電気抵抗式の開発，②穀粒性状への対応，③設置スペース，④耐久性，⑤時間遅れ補正の課題が未解決である。また，自脱コンバインによる収穫作業において，収量と同時に水分も連続測定を行うシステムの研究開発が，これまでの自脱コンバインの測定システム研究では行われておらず，未解決課題となっている。

１．３　本研究の目的と構成

精密農業を実現するためには，農業経営体に適した複数の技術を選択し，集約していくことが重要であり，その選択肢と可能性を広げるための技術開発が必要である。収量や水分の情報を精密に測定するシステムの開発は，まさにその技術開発の一つと位置付けられる。収穫作業においては，従来の作業体系，作業能率を変更することなく情報を取得できるような技術開発が必要である。すなわち，我が国においては，水稲や麦類の収穫に広く利用されている自脱コンバインの性能を維持したままで利用できる収量センサや水分センサの開発が必要であり，そのための課題は多い。また，既往の自脱コンバイン用の収量測定システムの研究では行われていないが，収量情報だけでなく同時に水分情報も連続して取得するシステムを開発することは大きな課題であり，それらを解決することは，我が国の水田栽培体系に精密農業を適用する可能性を広げる技術開発として大きな意義がある。

１．３．１　本研究の目的

本研究では，収穫作業において穀粒の質量と水分を同時に連続測定し，収穫後にそれらのマップ作成ができる自脱コンバインを開発することを目的とする。そのために以下の目標を設定した。

①要求される測定精度を明らかにし，開発する収量測定機能付きコンバインの基本設計を行うとともに，水分測定部の要素技術開発を行う。また，それらの結果をもとに供試コンバインの試作を行う。

②収量データおよび水分データの時間遅れ補正方法の検討，収量センサの傾斜補正および検量線などの収量測定システムの開発と，GPS を使用しないマッピングシステムの開発を行う。

③水稲および小麦を対象とした開発システムの性能を検証する。また，実際の水田において水稲や小麦の収量マップを作成し，マッピングシステムの検証を行う。

１．３．２　本研究の構成

本報告は５つの章より構成され，上記課題についてそれぞれ，第２章，第３章，第４章で開発および検証を行う。本報告の構成および内容は以下のとおりである(図 1-4)。

第１章では，研究の背景，研究・技術開発動向と課題の整理，本研究の目的と構成について述べる。

第２章では，主に開発機のハード部分について述べる。通常の自脱コンバインと水分測定法により収量マ

ップおよび水分マップを作成し，開発機に要求される精度を考察する。また，開発システムの全体構成および各測定システムの基礎設計，自脱コンバインに搭載して連続測定できる電気抵抗式水分センサの要素技術開発について述べる。また基礎設計や要素技術開発に基づいて行った供試コンバインの試作について述べる。

第３章では，主に開発機のソフト部分について述べる。時間遅れに関する検証および補正方法を質量センサと水分センサの両方について考察し，質量測定システムにおける傾斜補正方法の開発と検量線の開発，マッピングシステムの構成について述べる。

第４章では，開発システムの性能の検証について述べる。質量測定システム，水分測定システム，マッピングシステムについて行った検証結果と考察を述べる。また，システムの特徴と残された技術開発課題についても言及する。

第５章では，今後の展望について述べるとともに，本研究を総括する。

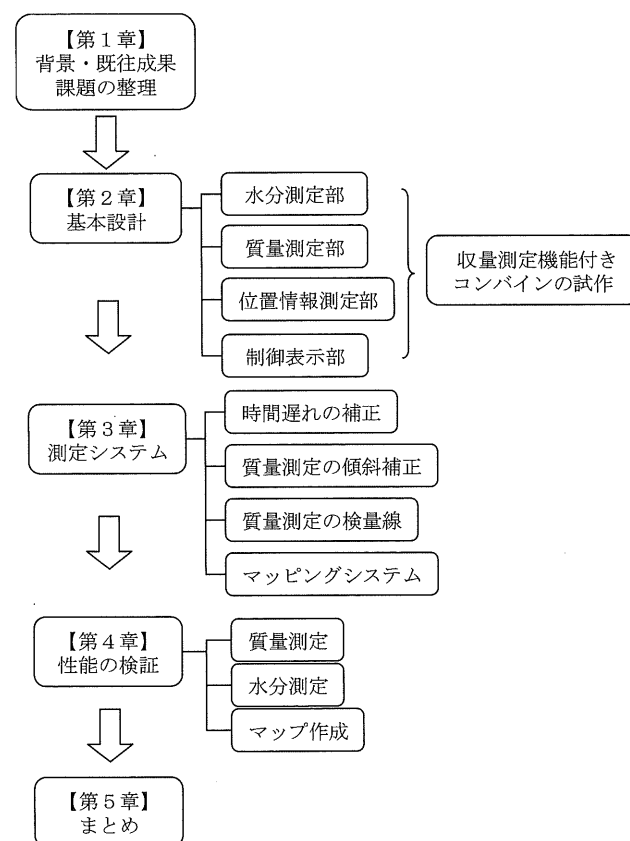



図 1-4 本報告の構成

第２章　基本設計と供試コンバインの試作

２．１　緒言

本章では，収量測定機能付きコンバインの基本設計について述べる。まず，要求される測定精度の基礎的な検討について報告した後，開発機の全体構成および各測定システムの基本設計，自脱コンバインに搭載して連続測定できる電気抵抗式の水分センサの要素技術開発に言及する。また，それらに基づいて行った供試コンバインの試作についても述べる。

２．２　要求される測定精度の基礎的検討

収量測定機能付きコンバインを開発するに当たって，実際に要求される測定精度の検討を行うことが重要であり，まず実際の圃場における穀粒の質量や水分のばらつきを調査することが必要である。そのため，水稲収穫時の穀物の収量や水分のばらつきを調査し，開発する収量測定機能付きコンバインに要求される測定精度について基礎的な検討を行った。

１）方法

生研センター附属農場において，1997 年から 2001 年にかけて，複数圃場について調査を実施した。調査する一筆の水稲圃場を 16.5～54.0 m^2 の小区画メッシュに区切り，メッシュごとにホッパ式の自脱コンバインで収穫し，籾質量を測定した。また，各メッシュで収穫された籾からサンプルを採取し，常圧定温乾燥法（105℃，24 時間）によって湿量基準の水分を測定した。

２）結果と考察

調査結果を表 2-1 に示す。収量については，水分15%換算の 10ａ当たりの収量をメッシュごとに計算した。メッシュごとの収量の最大値と最小値の差は，1997 年の試験区Ａが最も大きく 286kg/10ａ，2000 年の試験区Ｃが最も小さく 119kg/10ａであった。試験区Ａはメッシュの面積が 5.0m×3.3mと他の試験区よりも小さいためにばらつきが大きいとも考えられたが，2000 年の試験区Ｄのようにメッシュ面積が 7.5m×7.2mであっても，メッシュごとの収量の差が267kg/10ａとばらつきが大きい試験区もあった。最もばらつきの大きい試験区Ａのメッシュを 10 段階で評価すると，30kg/10ａごとにランク付けすればよいことになる（30kg/10ａは，全試験区の平均収量570kg/10ａの約５%にあたる）。この場合，最もばらつきの小さかった 2000 年の試験区Ｃでは４段階で評価できる。圃場収量の評価には「10ａ当たり何俵取れた」という言い方が一般的に行われていることから考えても，圃場評価のためには最低 30kg/10ａ（半俵）の精度が必要と考えることが妥当である。

しかし，このような精度目標だけでは，対象とする圃場の大きさ，あるいはメッシュの大きさを小さくすればするほど，その圃場，あるいはメッシュの絶対質量は小さくなるため，結果的に，より高い測定精度が要求されることになる。したがって，精度目標を決定するには，最小となるメッシュの大きさを決定する必要がある。しかし，実用的なメッシュサイズについては，今後の精密農業の研究を待たなければならないのが現状である。本研究では，収量測定機能付きコンバインの測定精度の一応の目安として，許容誤差５%以内という精度目標を１ａまでのメッシュサイズに適用することとした。言い換えれば，１ａ以上の区画を収穫した時の測定誤差が±５%以内であることを収量測定機能付きコンバインの質量測定精度の目安とした。

各試験区の平均籾水分は 23.0～29.9%であり，おおむね通常の水分条件下で収穫されていた。しかし，メッシュごとの籾水分は，最小で試験区Ａの 20.1%，最大で 2000 年の試験区Ｄの 41.2%であった。40%を超えたのは倒伏と降雨が重なり，収穫時に水浸しになっている場所であったが，それ以外の場所でも 35%程度の高水分のメッシュがあった。また，本試験では20%以下の水分のメッシュは観察されなかったが，現実の収穫場面では 20%を下回ることも十分考えられる。以上の結果より，水分の測定範囲を 15～35%程度と定めた。また，乾燥作業で水分情報を利用する可能性を考慮すると，予測標準誤差で水分１%以内の精度が必要である考えられた。

表 2-1 水稲作付け圃場における収量と籾水分の基礎調査（試験条件と結果）

調査場所:生研センター附属農場

ほ場	収穫年	品種	ほ場区画		小区画メッシュ			籾収量(kg/10a) 籾水分15%換算				籾水分(%w.b.)			
			面積(㎡)	長さ(m)×幅(m)	面積(㎡)	長さ(m)×幅(m)	ﾒｯｼｭ数	平均	最小	最大	標準偏差	平均	最小	最大	標準偏差
A	1997	あかね空	1980	60 × 33	16.5	5.0×3.3	120	491	350	636	53.8	23.0	20.1	26.8	1.33
B	1998	あかね空	900	30 × 30	28.1	7.5×3.75(注)	32	563	469	672	63.5	23.1	21.6	26.6	1.42
C	1999	朝の光	3240	45 × 72	54.0	7.5×7.2	60	524	429	647	58.4	23.6	21.9	25.3	0.82
	2000		3240	45 × 72	54.0	7.5×7.2	60	602	558	676	22.9	28.3	22.4	31.3	2.11
	2001		3240	45 × 72	54.0	7.5×7.2	60	633	547	716	40.0	24.9	23.2	30.4	1.44
D	1999	どんとこい	6480	45 ×144	54.0	7.5×7.2	120	576	436	649	42.3	27.4	22.6	35.0	2.44
	2000		6480	45 ×144	54.0	7.5×7.2	120	599	474	741	30.0	29.9	26.6	41.2	1.72

（注）作物列を考慮しないﾒｯｼｭ設定を行った試験

2．3　基本設計

2．3．1　全体構成

我が国で利用されている自脱コンバインは，我が国における水稲および麦類の収穫に適応した高い性能を有している。それらの高い性能を維持するために，コンバインの基本的な構造，性能を変更せずに，質量測定部，水分測定部，位置情報測定部の3つの測定部および制御・表示部を開発するものとする。これらによって，収穫作業と同時工程で，穀粒の質量と水分，作業時間，作業速度が測定・表示・記録される。収穫作業後に，測定データをもとに，穀粒の総質量と水分（平均値，最高値，最低値），水分15%換算の10 a 当たり収量，作業面積を計算・表示・記録する。さらに，水分換算をしない穀粒質量マップ，水分マップ，水分15%換算の 10 a 当たり収量マップの作成を行う。なお，対象作物は，供試機である自脱コンバインが収穫可能な水稲と小麦とする。

2．3．2　質量測定部

質量測定部は，収穫した穀粒の質量を収穫作業と同時に連続して測定する装置である。第1章で述べたように,欧米で市販されているものや国内で研究されているものの多くは，衝撃式や光学式のセンサによって，収穫した穀粒の流量をその搬送経路や穀粒タンク内で測定する方式である。しかし，日本で一般に普及している自脱コンバインは，脱穀選別後の穀粒をスクリュオーガによって搬送し，タンク内に拡散するため，その搬送経路において収穫した穀粒の全量をセンシングすることは困難である。また，欧米で使用されている流量を測定する方式の収量センサは，穀粒流量1 kg/s 以下の低流量時に検出不能な場合が多く，大きな誤差の要因になるとの報告がある[40]。海外の普通コンバインに比べると自脱コンバインは流量が非常に小さく，流量を測定する方式には限界があると考えられた。

以上のことから，本研究では穀粒の流量を衝撃板などのセンサを利用して穀粒搬送経路や穀粒タンク内で測定する従来方式ではなく，穀粒タンク内の穀粒の全量を測定する独自の方式を採用し，穀粒タンクの一端を支持するロードセルへの荷重により，タンク内の穀粒の質量を測定する方式とする。穀粒タンクの一端の荷重を測定する方式にすることで，ゼロから穀粒タンク満量までの広い範囲を測定しつつも，精度を得るための最低限の分解能を得ることができる。ロードセルへの荷重はコンバインの傾斜によって変動するため，ロードセル近傍に設置した傾斜センサによって出力の傾斜補正を行う。なお，市販のコンバインには機体水平制御機能を装備する機種があるが，これらは選別性能を維持する目的や作業者の快適作業を実現することを目的としたものであり，質量測定値を高精度に傾斜補正するには十分ではないと考えられたため，市販のコンバインの機体水平制御用に標準部品として使用されている安価なセンサを傾斜補正用に別に装備することとする（傾斜補正の詳細は第3章で述べる）。ロードセルは，穀粒タンク下のシャーシ上に設置するが，コンバインのメインテナンスの際の穀粒タンクの開閉は市販のコンバインと同様に行えることとする。

タンク内の穀粒の全量を測定する方式の利点は，①タンク内の穀粒全体の質量を測定対象としているため検出漏れがない，②タンク内質量全体を測定するため，測定値を積算していく流量測定方式のような誤差の累積が少なく，また厳密なゼロ較正が不要となる，③収穫物の性状に左右されにくい，④装置の構造が比較的簡素である，⑤センサ部への直接的な籾の衝撃や粉塵がないため耐久性の点で有利であることが挙げられる。一方，この方式の欠点としては，穀粒タンクの構造と密接に関連するシステムであるため外付けの装置とすることが難しいことが挙げられる。また，不整地を走行する車両に搭載する測定システムの共通的な課題とも言えるが，走行振動や機体振動の影響を受けることも欠点として挙げられる。

2．3．3　水分測定部

第 1 章で述べたように,欧米では市販の普通コンバインに取り付ける静電容量式の穀粒水分センサが利用されている。これらの水分センサでは，サンプリング方法に若干の相違があるものの，穀粒が脱穀選別されてから穀粒タンクに搬送される経路途中で測定している。しかし，日本で使用されている自脱コンバインには，欧米方式の水分センサを設置するスペースがない。その上，25%以上の高水分の穀粒を測定する場合やサンプリング容器内の穀粒密度の違いが発生した場合に，大きな誤差が生じることが報告されている[2]。

国内においては，かさ密度補正電極による密度補正と水分センサに内蔵される質量計での質量補正によって，32%程度の籾を高い精度で測定できるコンバイン用の高周波静電容量式水分計の開発が行われているが，機構が複雑となるためコンバインに搭載して実用的に

測定するまでに至っていないのが現状である[87) 90)]。

水分測定部は，①質量測定部と同様に，収穫作業と同時に連続して測定できること，②15～35％程度の水分測定が可能であること，③構造が簡素で小型であること，④コンバインで収穫された穀粒の密度や夾雑物割合などの性状の影響が少ないことが必要である。それらの要件を満たすために，新たに開発する水分測定部には電気抵抗式を採用する。電気抵抗式水分センサの測定原理は，駆動する２つのローラ電極で穀粒を連続して圧砕し，ローラ間の電気抵抗により水分を測定するというものであり，機器の構成が簡易である。ローラ電極をタンク内に収め，タンク内に拡散された直後の穀粒をサンプリングし測定する方式とする。なお，測定後の穀粒をタンク内に排出することとしたが，最終的には粉末化するため，乾燥過程で問題になることや，収穫物の品質低下などの原因にはならない。

２．３．４　位置情報測定部

収量測定機能付きコンバインの位置情報測定部は，ベース機の自脱コンバインに標準装備されている車軸回転速度から走行速度を測定する速度センサと，ベース機標準機能である方向制御用の株元検出センサを利用した刈取りセンサからの情報を利用した簡易式のものである。刈取りセンサで収穫作業を行っているかいないかの区別をし，作業速度データを時間で積分し，収穫作業を行った距離を測定するとともに，行程内における位置情報を測定する方式である。当然，作業時間，作業速度の情報も測定できる。我が国の水田では，田植機や条播機によって作物列が直線的に整列しており，このような簡易な方式の位置情報測定も有効であると考えられる。

また，GPS を装備した精密農業用の汎用コントローラとして生研センターで開発された「農用車両用作業ナビゲータ」[91)] を接続すれば，GPS 位置情報を利用することができるものとする。

２．３．５　制御・表示部

制御・表示部はタッチ式のパネルコンピュータで，各測定部の通信制御を行い測定，表示，記録を行った後に，圃場ごとの収穫情報の表示や，各種マップの作成を行う。このほか，質量計測や水分計測のための検量式（稲用・小麦用）の選択，初期風袋を消去するためのゼロ較正などを行う。なお，前述の農用車両用作業ナビゲータを利用すれば，GPS による位置情報を使った収量マップの作成ができるものとする。

２．４　水分測定部の要素技術開発

収量測定機能付きコンバインは，収穫作業と同時工程で 30％を超える高水分の籾や小麦の水分測定を高精度に連続測定することが必要である。そのため，水分測定部について，①サンプリング量と水分ローラ電極の検討，②室内における高水分籾の測定精度試験を行った。

２．４．１　サンプリング量とローラ電極仕様の検討

コンバインの収穫作業下で精度の高い測定を行うために，必要なサンプリング量について，まず次のような統計計算を行った。母平均の区間推定における必要サンプル数の大きさは下記の式で決定できる[92)]。

$$N = (Z_{\alpha/2} / Er \cdot \sigma)^2 \qquad (2.1)$$

ここで，N：必要サンプル数 ［粒］
Er：誤差 ［％］
σ：標準偏差
$Z_{\alpha/2}$：標準正規分布 $\alpha/2$％点

$Z_{\alpha/2}$は，95％信頼区間推定の場合 1.96 であり，誤差 Er は水分１％（ポイント）とした。また，前項２．２の圃場調査結果より，各メッシュの水分の標準偏差の平均は 1.61 であった。その 2.5 倍の 4.03 を母平均の区間推定に使用する標準偏差とすると，N＝62.4 粒となった。

さらに，穀粒損失の観点から次のような検討も行った。平均籾収量 570kg/10ａの圃場（前項２．２）を４条自脱コンバインが 1.5m/s の高速作業を行うと仮定すると，毎秒 1,030g の穀粒が収穫され，千粒重を 20ｇと仮定すると毎秒 51,500 粒が収穫されると試算できる。日本における水稲のコンバイン収穫作業下での水分測定サンプルとして許容できる穀粒損失は 0.1％程度であると考えられ，毎秒 51,500 粒のうち 0.1％の毎秒 52 粒のサンプリングは可能であると考えた。

以上のことから，水分測定部が信頼性の高い水分測定を行うためには，毎秒 50～60 粒の測定をすることが必要であるという結論が得られた。

しかし，市販の穀物乾燥機で使用されている電気抵抗式水分計（単粒式）の幅６㎜ のローラ電極は，毎秒７粒程度しか測定できない。そのため，試作機のロ

ーラ電極を 7.5 倍の 45mm に広げ，複数の穀粒を同時に測定できるようにすれば，計算上，毎秒 52.5 粒の測定が可能になると考えた。しかし，図 2-1 の回路２に示したように，単にローラ電極の幅を広げるだけでは，圧砕された複数の穀粒が並列接続となり，電気抵抗が従来の単粒水分計の 0.13 倍と非常に小さくなる。この場合，従来の単粒水分計の検量モデルをあてはめると，見かけ上高い水分測定値を示すと同時に，高水分域で出力信号が飽和してしまうことが計算上明らかになった。その問題を改善するため，18mm 幅のローラ電極を図 2-1 の回路３の図に示すように３つ直列接続することで，サンプル量を確保するとともに，理論上，従来の単粒水分計と同等の出力が得られる構造とした。その結果，市販の穀物乾燥機用に利用されている単粒水分計の検量モデルを準用できるようになった（図 2-1 の回路３）。以下，この方式を「電気抵抗式水分計（複粒式）」と呼ぶ。

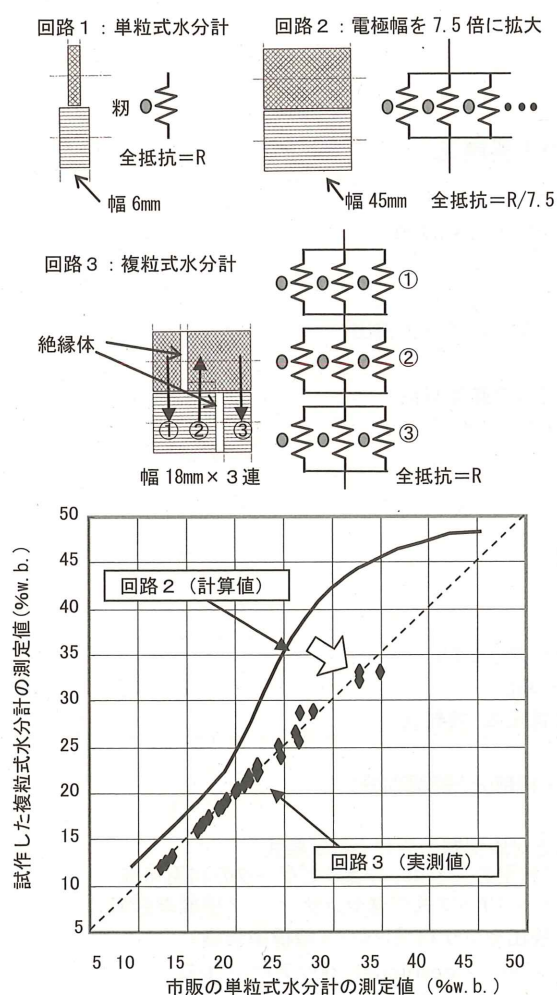



図 2-1　ローラ電極回路の改良

２．４．２　室内性能試験

籾の枝梗付着による密度の変化，機械振動などの諸々の条件が予想される実作業下で水分測定をする前に，まず，試作した水分測定部の基礎的な測定精度を室内で調査した。

１）試験方法

図 2-1 の回路３の図で示した電気抵抗式水分計（複粒式）と同様のローラ電極を有する水分計を試作した（図 2-2）。水分計の仕様は後述する収量測定機能付きコンバイン試作機の水分測定部と同様である。室内での測定精度試験には，低水分から高水分までの籾を同一試験で測定するため，あらかじめ水分を調製した籾（水分約 15%の籾 10kg に，0.0 から 4.0 リットルまで５段階で加水して，１週間程度冷蔵庫内に貯蔵し，毎日数回ずつ攪拌）を供試した。測定前日に，籾を冷蔵庫から測定室に移し，表面に付着した水滴を乾かした。試作した水分測定部を台上に設置し，水分調製した籾を手で連続的に供給して試験を行った。そして，測定直後のサンプルを，アルミ秤量缶に採取し，常圧定温乾燥法（105℃，24 時間）で水分を測定した（試験日時：1999 年４月６日，場所：生研センター，供試品種：ゆめみのり）。

図 2-2 水分センサ試作機

２）試験結果

試験結果を図 2-3 に示す。予測標準誤差（SEP）は 0.55 であり，約 30%の高水分域の測定値も値が飽和したり，ばらついたりすることなく，非常に高い精度で測定できた。また，測定時のサンプリング量を実測

した結果，平均して毎秒 57 粒の測定ができ，目標の範囲内であることも確認できた。

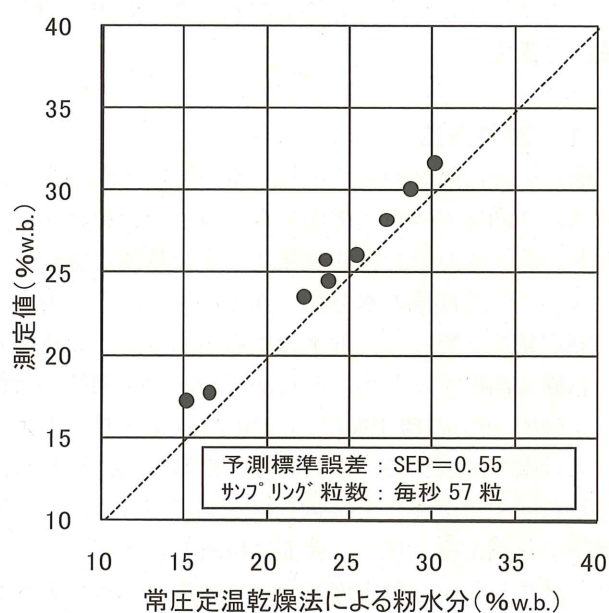



図 2-3 水分測定精度試験結果
（室内試験）

2．5　コンバインの試作

2．5．1　構造と諸元

これまで述べた基本設計と水分センサの試験結果をもとに，収量測定機能付きコンバインの試作を 2001 年に行った（以下，2001 年試作機という）。2001 年試作機の主要諸元を表 2-2 に示す。2001 年試作機は，市販の４条自脱コンバイン（㈱ヤンマー，GC440）をベース機とし，質量測定部，水分測定部，位置情報測定部の３つの測定部，および制御・表示部で構成される（図 2-4，図 2-5）。質量測定部は，ロードセルで穀粒タンク前方を支持する構造とし，その近傍に傾斜センサを取り付けた（図 2-6）。水分測定部については，前項２．４で述べた電気抵抗式水分計（複粒式）を穀粒タンク内の排出オーガ近傍に取り付けた（図 2-7）。また，位置情報測定部は，GPS を利用しない速度計と刈取りセンサによる行程ごとの位置認識のみを行う簡易式のものとした。

表 2-2 2001 年試作機の主要諸元

ベース機（自脱コンバイン）	メーカー、型式		ヤンマー、GC440
	全長×全幅×全高（mm）		4,010×1,910×2,200
	機関定格出力（kW）		30.9
	刈取条数		4
	穀粒処理方式		グレンタンク、オーガ排出
	タンク容量（L）		1050
質量測定部	方式		穀粒タンク質量測定
	ロードセル	全長×全幅×全高（mm）	200×110×29
		定格容量（kN）	4.9
		定格出力（mV/V）	1.50
		入力抵抗（Ω）	350
	ストレインアンプ	ゼロ補正機能	自動
		サンプリング周波数（Hz）	100
		A-D変換分解能(bit)	12
	傾斜センサ	検出角度（°）	水平に対し±7.5
		応答時間（ms）	250～350
水分測定部	方式		電気抵抗式（複粒式）
	ローラ電極	直径(mm)	30
		幅(mm)	65（電極部分と絶縁部分）
		間隔（mm）	1
位置測定部	方式		車速と刈取情報のみによる簡易式 （GPS利用の場合は、作業ナビゲータの利用可能）
	車速センサ		電磁ピックアップ式車速センサ（ベース機標準装備）
	刈取りセンサ		株元検出センサ利用（ベース機標準装備）
制御・表示部	パソコン		RW-A240(Copernicus)、タッチパネル式
	データ通信方式		EIA-232、RS-485、USB

※各部の電源は、コンバインバッテリより供給

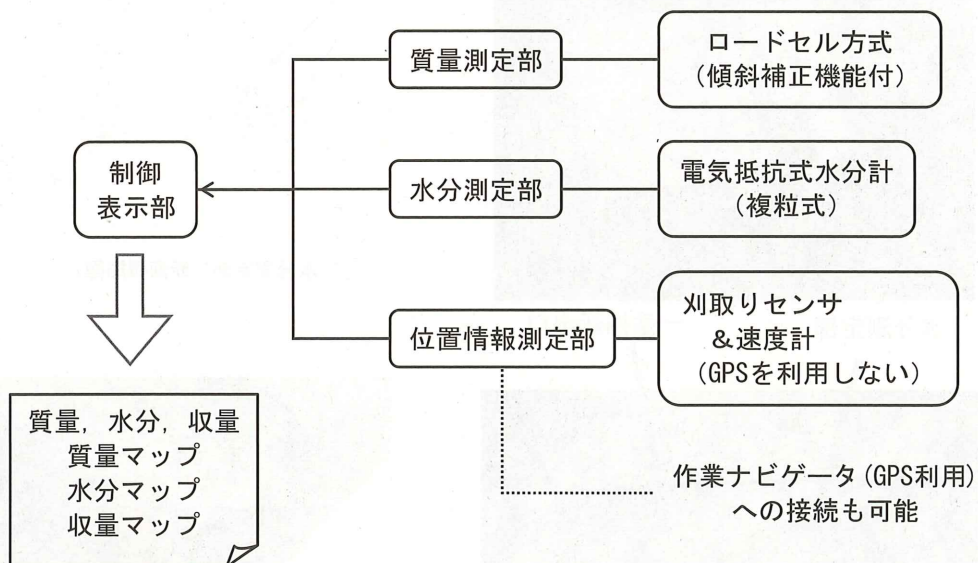



図 2-4 2001 年試作機

図 2-5 2001 年試作機のシステム構成

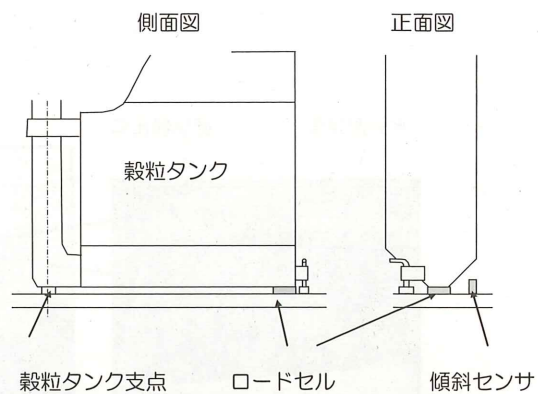



図 2-6 2001 年試作機（質量測定部）

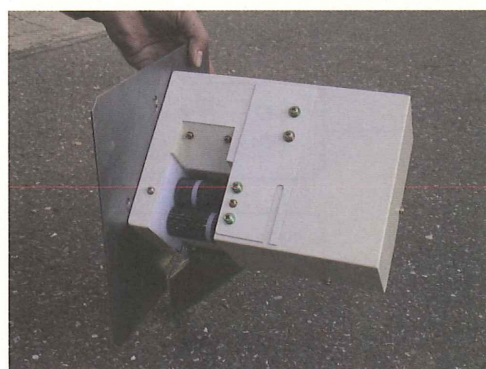
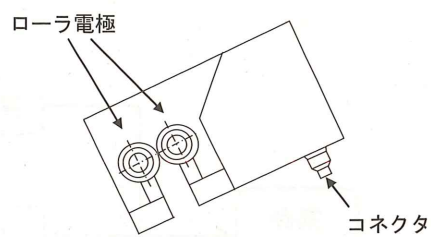
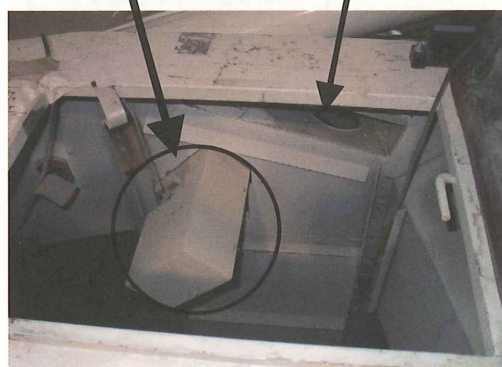
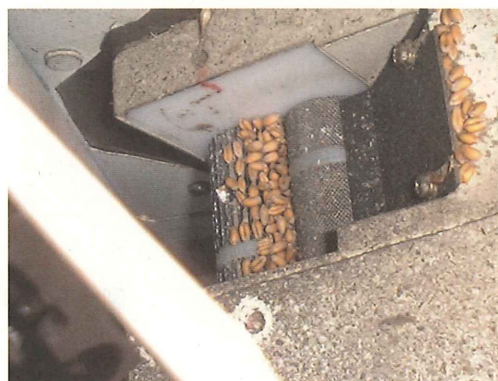



図 2-7 2001 年試作機（水分測定部）

2．5．2　収穫作業下での連続測定

2001 年試作機を利用して水稲収穫作業を行い，各部よりデータを取得した（日時：2001 年 11 月 3 日，場所：生研センター附属農場，品種：ゆめみのり）。図 2-8 に記録データの一例を示すが，各測定部により，穀粒の質量と水分，位置情報に関する収穫情報の測定・記録が収穫作業と同時工程で円滑に行えた。質量データには平滑処理前後のロードセル出力の２つのグラフを示したが，走行振動と作業機からの振動の影響により，計測波形にも振動が見られるが質量増加による振幅の増加はなく，平滑処理を行うことにより機械振動などの影響を除くことができた。また，図中のロードセル出力は，時間遅れ補正や傾斜補正を行っていないグラフであるが，特に収穫作業行程の開始および終了時（刈取センサの出力が変化する部分）に，コンバイン機体のピッチ傾斜の影響，データの時間遅れと思われる出力変動が見られる（これらの補正方法については第３章で述べる）。水分は，刈取りを行っていない区間でも一番揚穀オーガから穀粒が多少排出されサンプリングするため測定値が出力されているが，刈取りセンサが株元を検知せず，作業行程外として認識される区間の測定値は除外されるので測定精度に影響を及ぼさない。

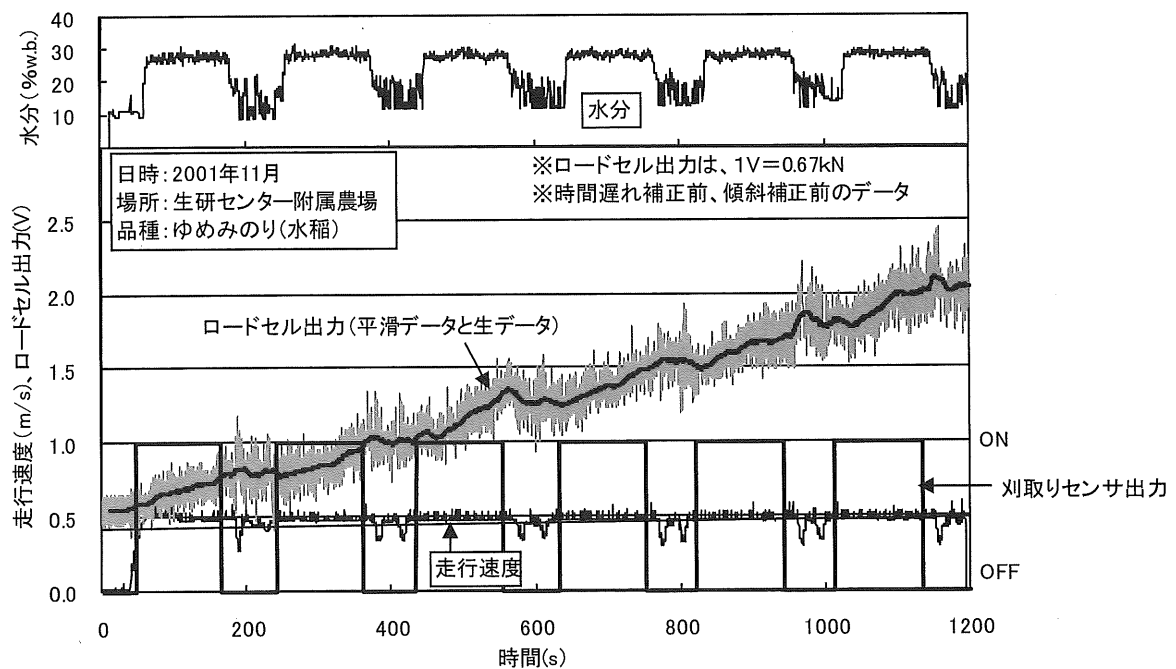



図 2-8 収穫作業下での連続測定の一例

第３章　測定システムの開発

3．1　緒言

本章では，収量測定機能付きコンバインの測定精度に関わるシステム開発として，時間遅れ補正方法の検討，質量測定部のロードセル出力の傾斜補正式および検量線の作成，GPS を利用しない簡易な位置情報測定の精度確認などを行った結果を報告する。また，収量測定機能付きコンバインで作成したマップについても述べる。

3．2　時間遅れ

収量測定機能付きコンバインにおいて，穀粒は刈取り部，脱穀部，選別部を経て（一部は，平行処理胴を通過したり，二番還元として再度選別されたりする），穀粒タンク内に搬送され，そこで質量や水分が測定される。このため，刈取りセンサと速度計から算出される位置情報（あるいは農用車両用作業ナビゲータによ

るGPSを利用した位置情報）と質量や水分の測定値には，時間差が生じることになる。測定データの処理に当たって，この時間遅れを補正して，他のデータと時間軸を同期させることが必要であるため，収量測定機能付きコンバインの時間遅れを調査した。

1）試験方法

収量測定機能付きコンバインにおける時間遅れの定義を，刈取りセンサがOFFからON，あるいはONからOFFに変化した時点から，質量測定部や水分測定部の出力が変化するまでの時間とした（図3-1）。2001年試作機を供試して，実際の収穫作業下でのデータ測定および観察によって時間遅れを調査した。作業速度は，0.3m/s，0.5m/s，0.7m/sの3段階とし，常に一定速度で収穫作業を行った。試験日時は，2001年11月3日および2001年11月13日，試験場所は生研センター附属農場，対象作物は水稲（品種：ゆめみのり）とした。

2）試験結果および考察

時間遅れの測定は，質量データでn=144点（刈始めn=73，刈終りn=71），水分データでn=208点（刈始めn=104，刈終りn=104）を行った。測定した時間遅れの作業速度別，測定部別の平均値を表3-1に示す。全データを測定部ごとにヒストグラムにすると図3-2のようになった。最頻値は質量測定部で12～15秒，水分測定部で14～15秒であった。さらに，試験中の観察では，刈始めてから約15秒後にタンク内に籾が搬送されることが確認された。また，2001年6月に行った小麦収穫でも同様のことが観察された。

1.2.1で述べたように，時間遅れに関して，複雑な時間遅れ補正式が必要であるとするものや，単純な時間遅れを一律に補正すればよいとするものなど，その見解は様々である[29) 32) 37) 46) 47) 93)]。我が国では，帖佐らがコンバインの脱穀選別過程における二番還元を考慮して，測定データに時間の重み付けを行うことで，より正確な時間遅れの補正を試みている[73)]。

コンバインの二番還元率が，作物条件，機械条件，作業条件などの諸々の因子による影響を受けていることは明らかであるが，今回の試験では，作業速度や作物条件，機械条件が比較的同様と思われる条件下においてさえも，時間遅れは必ずしも一定でないことが確認された。実際の収穫作業下では，さらに諸条件が刻々と複雑に変動するため，複雑な計算処理を用いて

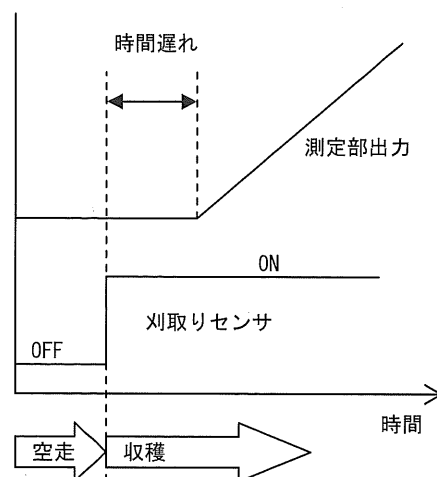



図3-1 時間遅れの定義

表3-1 時間遅れ（平均値）の測定結果

（単位:s）

作業速度	水分測定部			質量測定部		
	全体	刈始め	刈終り	全体	刈始め	刈終り
0.3m/s	18.5	16.0	21.0	14.5	13.0	16.0
0.5m/s	16.7	16.7	16.7	15.0	15.1	14.9
0.7m/s	16.7	13.4	20.4	14.6	12.5	16.6

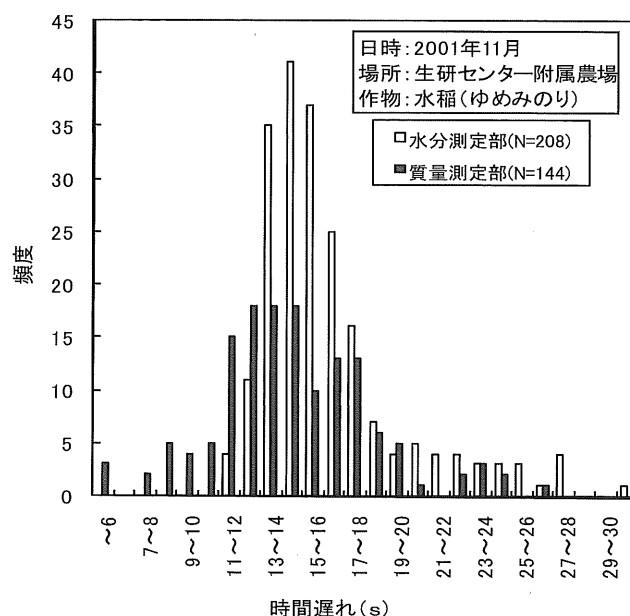



図3-2 時間遅れのヒストグラム

時間遅れを補正することは非常に困難であり，実用的でないと判断した。

以上より，本研究では複雑な時間遅れ補正を行わず，実用的なデータ処理方法の一つとして，時間遅れを一律に処理する方法を採用した。また，一律の時間遅れの値としては，質量測定部および水分測定部の測定データから求めた時間遅れの最頻値と観察結果において共通的だった15.0秒と決定した。

質量測定について，以上のような時間遅れの設定方法が実用上の問題にならないかどうかは，収量測定機能付きコンバインの収量測定精度に集約されると考えられるため，後に述べる傾斜補正の精度評価や，実際の収穫作業下での測定精度評価を行う際に，再検証することとした。

質量測定は，時間遅れ補正によって測定値の補正がある程度の精度で行えるが，水分測定は，二番還元などで穀粒が混合されると，測定サンプルそのものが均質化されてしまい補正が難しいという本質的な課題が存在している。しかし，二番還元率は脱穀室内の全流量の 10～25%程度であり [94]，すなわち，収穫した穀粒の９割程度が脱穀後に直接穀粒タンクに搬送されることを考慮すれば，収量測定機能付きコンバインの時間遅れ補正後の水分表示値はおよその代表値と考えて良いと判断した。

３．３　質量測定システム

３．３．１　傾斜補正方法の開発

圃場の傾斜や加減速・旋回などによるコンバインの機体傾斜は，ロードセル出力に影響を与えて測定誤差の要因となる。この問題に対応するため，質量測定部のロードセル付近に設置した傾斜センサによる傾斜補正機能を付加した。本項では，傾斜補正方法の開発について述べる。

１）機体傾斜によるロードセル出力の変動

ａ）試験方法

タンク内の籾質量が０kg，100kg，200kg，300kg，400kg のそれぞれの場合において，コンクリート傾斜路面を登り降りさせることによりピッチ角を連続的に変化させた。また，ロール角は収量測定機能付きコンバインのベース機となった自脱コンバインに標準装備されている油圧によるロール方向の機体傾斜機能を利用して，連続的に変化させた。以上の方法でピッチ角やロール角を変化させた時に，ロードセル出力と傾斜センサ出力を同時に連続的に測定した。試験日時：2002 年７月 15 日～７月 19 日，試験場所：生研センター，供試穀粒：籾（品種：ゆめみのり，2001 年産）。

ｂ）試験結果および考察

その結果，ピッチ角を－11.3°～＋11.3°（前傾斜～後傾斜），ロール角を－5.6°～＋5.6°（左傾斜～右傾斜）に変化させることができた。横軸をピッチ角，縦軸をロードセル出力とし，タンク内籾質量別にプロットしたものを図3-3に示す。ピッチ角によってロードセル出力は大きく変動し，グラフの傾きはタンク内の籾質量によって変化していることが分かる。また，前年度の水稲収穫作業時に計測した収量測定機能付きコンバインのピッチ傾斜およびロール傾斜は，それぞれ±1.5°以内であったことから，この傾斜変動を仮定した場合の測定値への影響を質量換算して評価するために，ピッチ傾斜による質量測定値の変動を後述する質量検量線を用いて求めると，タンク内籾質量０kg，100kg，200kg，300kg，400kg のそれぞれの場合で，変動幅が 9.8kg，13.1kg，16.5kg，20.2kg，31.1kg であった。それに対して，ロール角による質量測定値の変動は，0.9kg，1.1kg，1.9kg，2.8kg，3.9kg であり，ピッチ角の場合に比べると非常に小さく，大きな誤差要因とならないことが確認されたため，ロードセル出力の傾斜補正はピッチ角のみを用いて行うこととした。

２）傾斜補正式の作成

ａ）補正方法

ピッチ角による傾斜補正式を次の方法で求めた。ロードセル出力Eとピッチ角Pより傾斜補正係数Cpを重回帰分析で求め，水平換算のロードセル出力E'を算出した。なお，傾斜補正係数Cpは，ロードセル出力とピッチ角の関数として表される。

$$Cp = f(E, P) \qquad (3.1)$$

$$E' = f(E, P, Cp) \qquad (3.2)$$

ここで，E ：ロードセル出力　[$\mu\varepsilon$]

E'：補正後ロードセル出力　[$\mu\varepsilon$]

P ：ピッチ角　[°]

Cp ：傾斜補正係数　[ND]

ｂ）補正結果

ピッチ角によりロードセル出力変動を補正した結果

を図 3-4 に示す。補正前の図 3-3 と補正後の図 3-4 を比べると，補正により変動が小さくなったことが分かる。前述と同様に測定精度に対する影響を質量換算して評価すると，ピッチ傾斜による質量測定値の変動は，タンク内籾質量 0 kg，100kg，200kg，300kg，400kg のそれぞれの場合で，傾斜補正前の変動幅が 9.8kg，13.1kg，16.5kg，20.2kg，31.1kg に対して，傾斜補正後の変動は，1.6kg，3.5kg，4.3kg，5.8kg，6.4kg となり，傾斜補正が効果的に行われたことを確認できた。

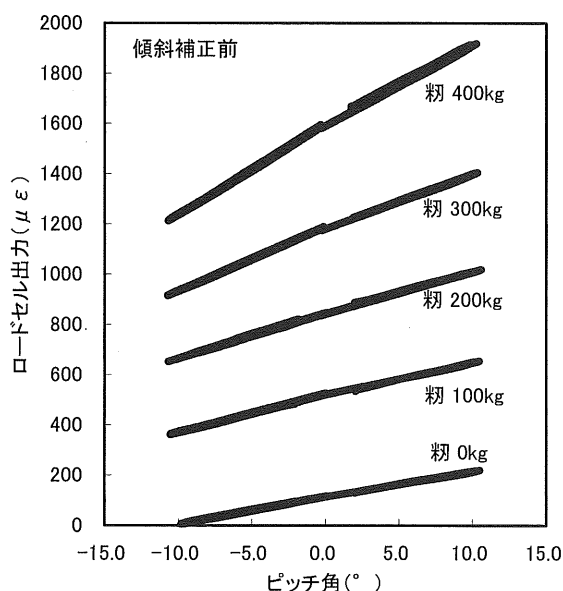



図 3-3 ロードセル出力変動（補正前）

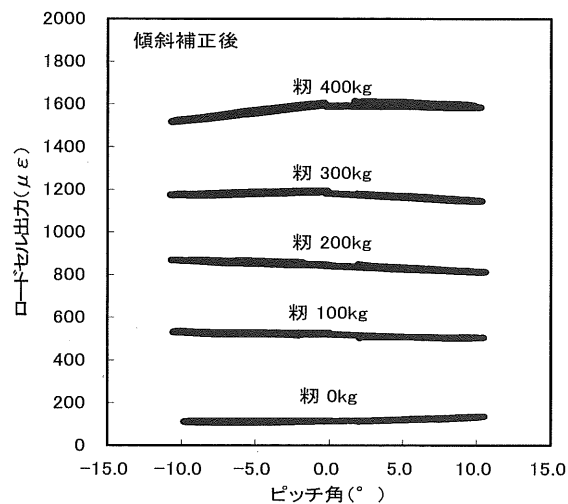



図 3-4 ロードセル出力変動（補正後）

3）実際の収穫作業下での傾斜補正

a）試験方法

2001 年試作機で，実際の収穫作業下での測定を行った時の傾斜補正の効果を確認した。なお，補正の効果を質量で示した方が分かりやすいため，後述の質量検量線を用いて，ロードセル出力を質量換算して評価した。

b）試験結果および考察

試験の結果，いずれの試験でも傾斜補正が精度の向上に効果的であることが確認された。その一例として，まず，刈取り部，脱穀選別部を動作させ，小麦収穫後の圃場を速度 0.5m/s で走行した時（穀粒タンクに小麦が約 13kg）の傾斜補正の様子を図 3-5 に示す。補正前のロードセル出力はピッチ角と同様に変動し，1.5kg 程度の変動が見られるが，補正後は 1.0kg 以内の変動に収まり，傾斜補正の効果が大きいことが分かる。また，水稲収穫作業下における測定結果を図 3-6 に示す。約 100kg の籾を収穫した後，停止および発進した時に発生した大きなピッチ角変動によって補正前の質量測定値は大きく変動しているが，補正後の質量測定値はピッチ角変動に関わらず一定の値を示したことから，傾斜補正が有効であることが分かる。また，図 3-6 の白抜きの丸でプロットした点は，時間遅れを 15.0 秒として全データの時間軸を同期させた後の質量データを 10m 毎にプロットしたものである。この図が示すとおり，刈取りセンサが刈取り開始時に稲を検出すると同時に質量測定値が増加していることから，時間遅れの処理も実用的なレベルで行われていると考察された。また，ヘッダ上下動作時，旋回時も同様に確認した結果，いずれも傾斜補正が効果的に行われていた。

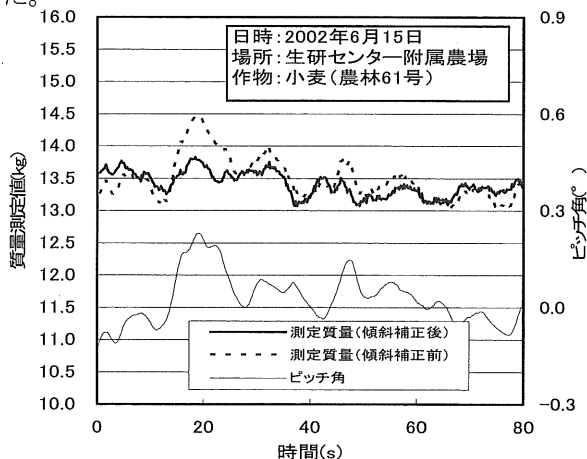



図 3-5 ロードセル出力変動（水田走行）

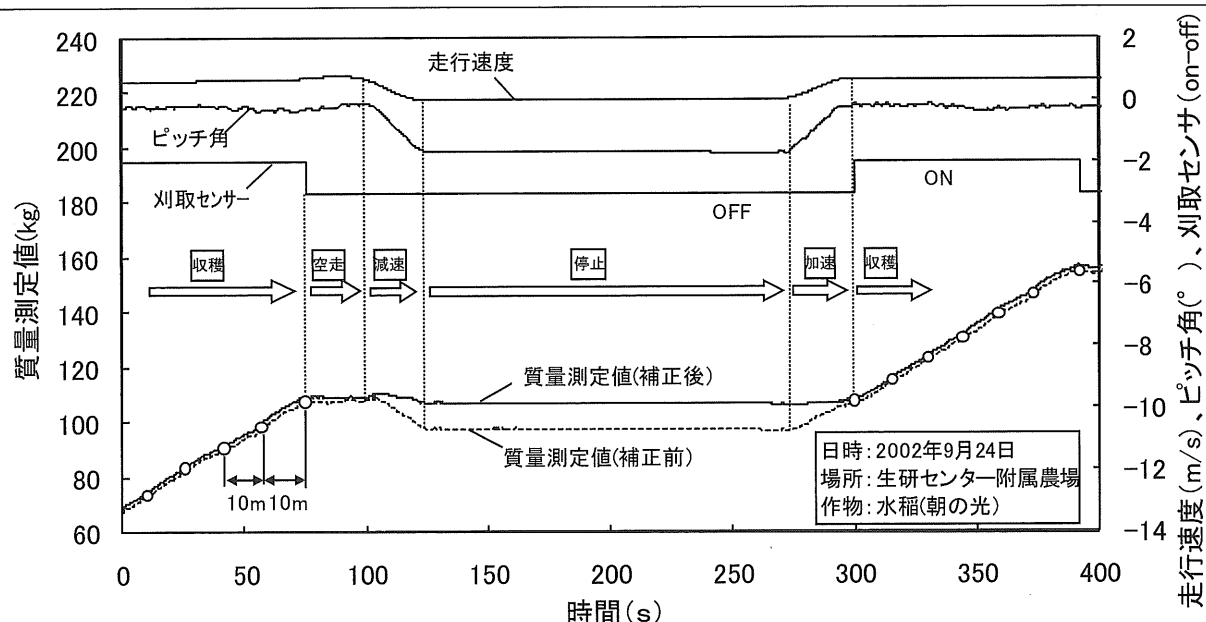



図 3-6 ロードセル出力変動（収穫作業時）の一例

3．3．2　質量検量線の作成

1）作成方法

タンク内の収穫物質量 W を求める検量線を，下記のように水平時換算のロードセル出力 E' に質量係数 C_W を乗じた関数として求めた。

$$W = E' \times C_W \qquad (3.3)$$

ここで，W　：タンク内の収穫物質量［kg］

E'：補正後ロードセル出力［$\mu\varepsilon$］

C_W　：質量係数　［ND］

2）試験方法

水稲および小麦収穫を行い，真の収穫質量と 2001 年試作機による測定値とにより，それぞれの質量係数 C_W を求めた。試験条件を表 3-2 に示す。なお，真の収穫質量の測定は，2001 年試作機で収穫した後，収穫物を排出した運搬トラックの質量増加分を，トラックスケールにて最小単位 1 kg で測定した質量とした。

3）試験結果および考察

その結果，水稲，小麦ともに相関係数 r>0.99 の検量線が得られた。質量係数 C_W は，水稲で C_W =0.300，小麦で C_W =0.260 であった（図 3-7)。水稲と小麦の質量係数が異なるのは，穀粒密度の差によって穀粒タンクに堆積した穀粒全体の重心が異なること，また，水稲と小麦では，穀粒性状の相違によってタンク内の堆積の偏りの状態が異なるため，穀粒タンクの一端を支持しているロードセルへの荷重に差が生じることが理由と考察された。質量検量線を同じものとするには，堆積状態に依らない測定方式，例えば，穀粒タンクの複数個所の荷重を測定したり、穀粒タンクを吊り下げたりして，穀粒タンクの全質量を測定する方法などが考えられる。しかし，そういった方式では，コンバインの穀粒タンクやシャーシ，穀粒排出オーガなどの大きな構造変更を避けることができないため，本研究では，異なる質量係数を設定する方法を採用した。

表 3-2 質量検量線作成のための試験条件

	日時	場所	品種	平均穀粒水分(%w.b.)	面積(㎡)	作業速度(m/s)
小麦	2002年 6月	生研センター 附属農場	農林61号	29.3	96～480	0.5
水稲	2002年 7月	高知県 農家ほ場	コシヒカリ	17.6	24～480	0.5～0.9

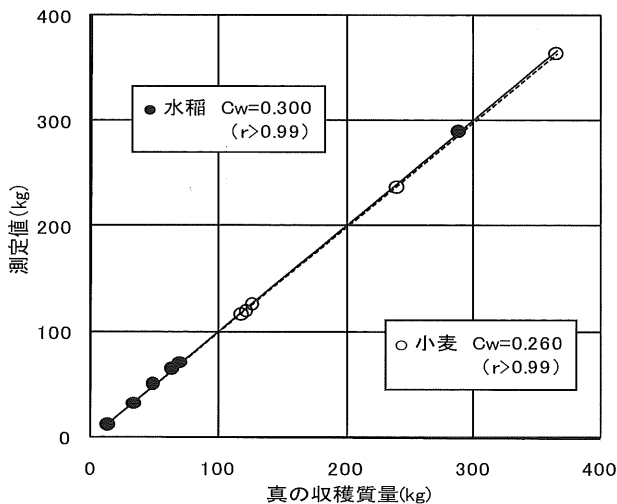



図3-7 質量検量線

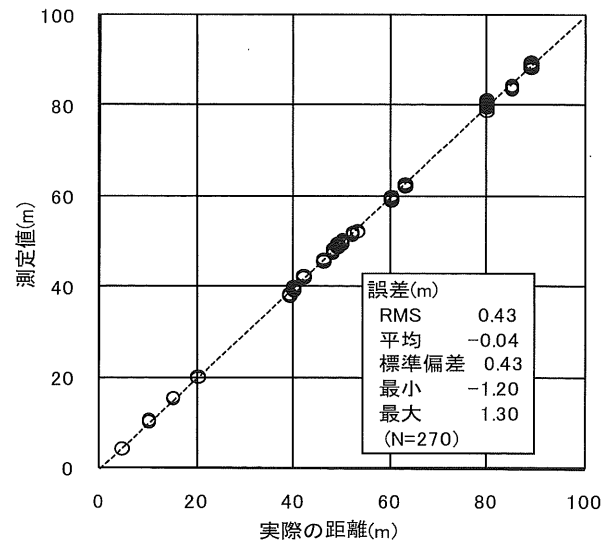



図3-8 距離測定精度試験結果

3．4　位置情報測定システム

試作した位置情報測定部は，市販の自脱コンバインに装備されている車軸回転速度から測定する方式の車速計と，刈刃位置の作物の有無を検出する刈取りセンサを用い，収穫作業時であるかないかの区別をし，作業速度データを時間で積分し収穫作業を行った距離を測定するとともに，収穫行程内における位置情報を測定する方式である。試作した位置情報測定部の作業行程内の距離測定精度試験を以下のとおり行った。

1）試験方法

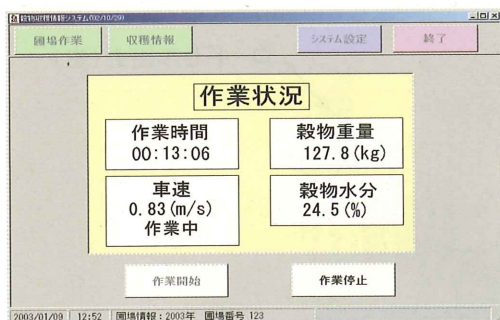
小麦や水稲の圃場において，あらかじめ長さの異なる直線行程を用意し，実際に小麦や水稲の収穫作業を行うと同時に，位置情報測定部により収穫作業を行った距離を測定した。その後，実際に作物を収穫した距離と測定値との比較を行った。試験条件は，小麦収穫（試験日：2002 年6月，場所：生研センター附属農場，試験数：28，距離：46.0～90.0m），水稲収穫（試験日：2002 年8月～11 月，場所：高知県農家圃場，千葉県農家圃場，生研センター附属農場，試験数：38，距離：4.4～90.0m）であった。

2）試験結果および考察

結果を図3-8に示す。測定精度に対する圃場，作物，作業速度の違いによる影響が認められなかったため，すべての結果をまとめて図示した。誤差の二乗平均平方根（RMS）は 0.43（m）と小さく，90m程度までの距離を概ね1m以内の精度で測定できた。

3．5　マッピングシステム

3．5．1　機能

制御・表示部の初期画面上で，圃場番号を入力して測定画面を起動した後，測定開始ボタンに触れると，収穫作業と同時工程で穀物質量，水分，作業時間，作業速度が測定，表示，記録される。作業中は，タンク内の穀粒質量と水分の測定生データがリアルタイム表示（表示の読みやすさを考慮して2秒ごとの平均値が表示）される（図 3-9-A）。終了ボタンに触れると測定を終了し，圃場面積（総作業面積），総収穫質量（生の質量と水分 15%換算した質量），10ａ当たりの収量（水分 15%換算した収量），水分（平均値，最大値，最小値）が表示される（図3-9-B）。また，2001 年試作機はGPSの位置情報を持たず，位置情報測定は収穫作業行程の認識および行程中の位置のみを測定することで行う。したがって，このままでは行程ごとの帯状の収量マップを得ることしか出来ないが，周り刈り作業か往復作業のどちらかをマップ作成時に設定メニューから手動で選択して決めることによって，行程ごとの位置関係を決定して圃場1筆の収量マップを作成

A) 測定画面

B) 収穫情報

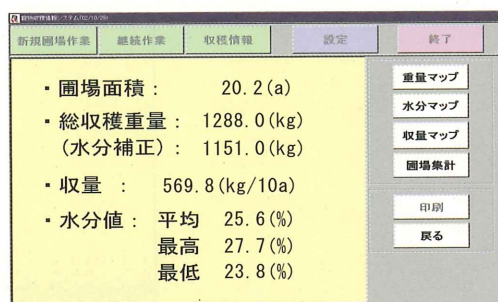
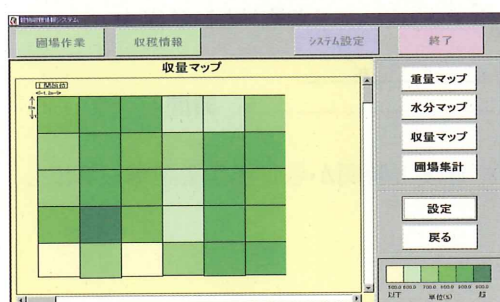
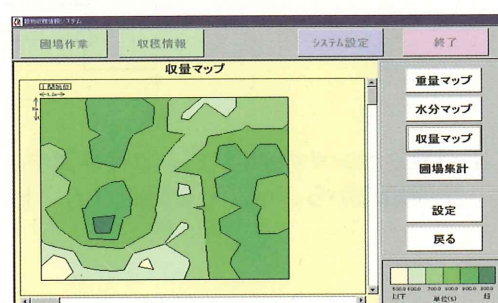
C) 収量ﾏｯﾌﾟ（ﾒｯｼｭ）

D) 収量ﾏｯﾌﾟ（等高線）

図 3-9 収穫情報の表示画面

することができる。また，任意メッシュサイズ（幅はコンバインの刈幅の倍数）でマップ作成が可能である（図 3-9-C)。マップの格子状データから，等高線マップの表示も可能である（図 3-9-D)。

3.5.2 データ処理方法

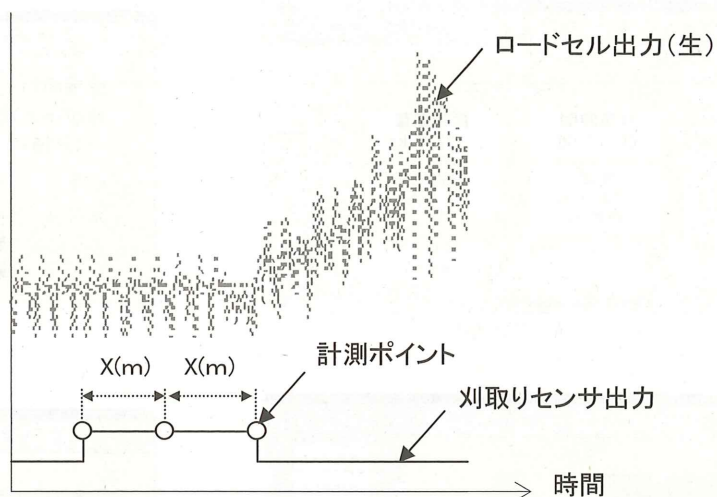
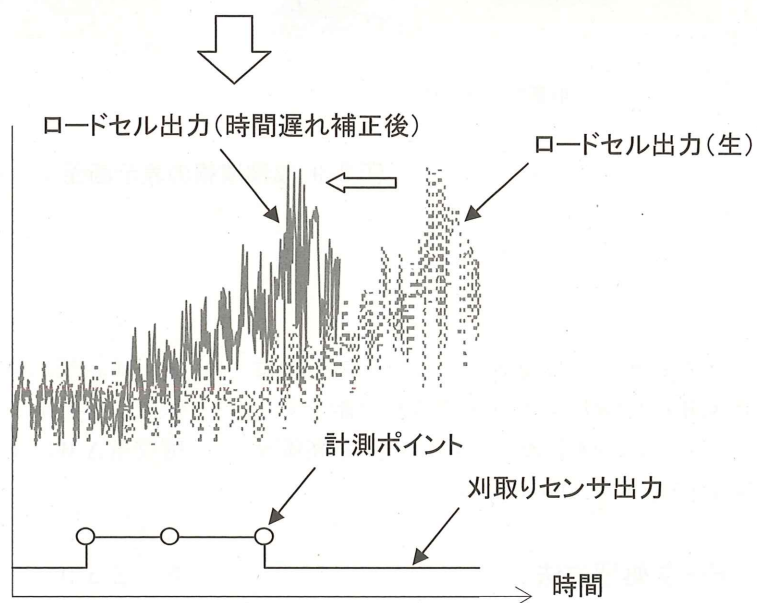
測定データの処理方法は，以下のとおりである（図 3-10)。例えばXmごとのマップを作成する場合，次のとおりとなる。①刈取りセンサの ON 状態を作業中と認識して，速度データを時間で積分して収穫作業距離を算出し，作業開始点からXmごとを計測ポイントとする。②質量測定部からのロードセル出力と傾斜センサ出力，および水分測定部からの水分データの時間遅れを補正して，位置情報測定部の測定データと同期させる。③収穫質量の計算は，ロードセル出力と傾斜センサ出力を，それぞれ各測定ポイントの前後±10 秒間で単純平均して平滑化した後，ロードセル出力の傾斜補正を行う。④隣り合う測定ポイントの計測値（傾斜補正済み）のロードセル出力の差ΔEに質量係数C_Wを乗じたものを，Xmごとの各測定区間の収穫質量ΔWとする。また，総質量はΔWの総計とする。

$$\Delta W = \Delta E \times C_W \qquad (3.4)$$

$$W = \Sigma \Delta W \qquad (3.5)$$

ここで，W　：総質量　[kg]
ΔW：測定区間の収穫質量増加量　[kg]
ΔE：測定区間ロードセル出力増加量　[$\mu\varepsilon$]
C_W　：質量係数　[ND]

この方式により，設定したメッシュ区画に必要な計測ポイントのみデータ処理をするため，データ処理工程が簡易となり，マップ作成を高速に行うことができる。

また，質量データからは，各測定ポイントの測定値

①刈取りセンサのON状態を収穫作業中と認識して，速度と時間から収穫作業距離を算出し，作業開始点からXmごとを計測ポイントとする。

②質量測定部からのロードセル出力と傾斜センサ出力，および水分測定部からの水分データの時間遅れを補正して，位置情報測定部の測定データと同期させる。

（次頁へつづく）

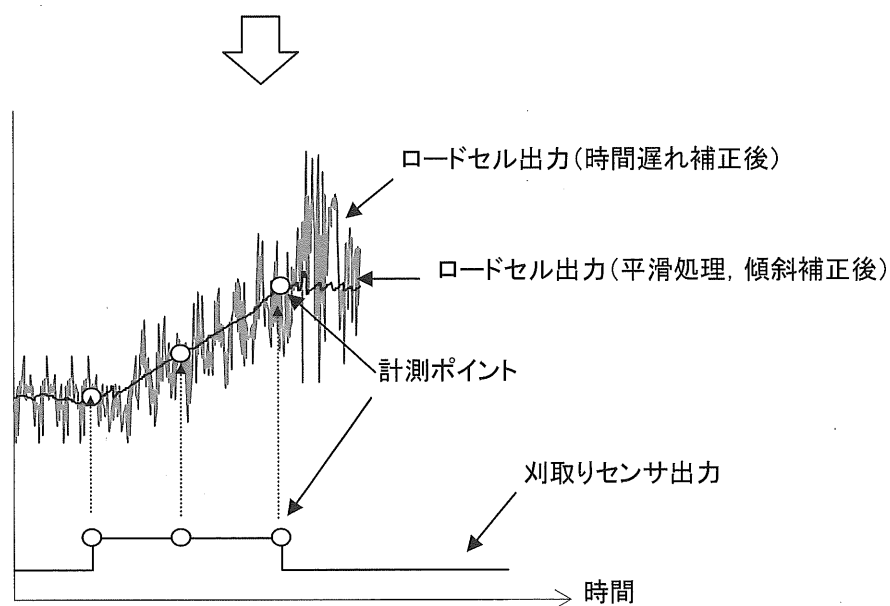
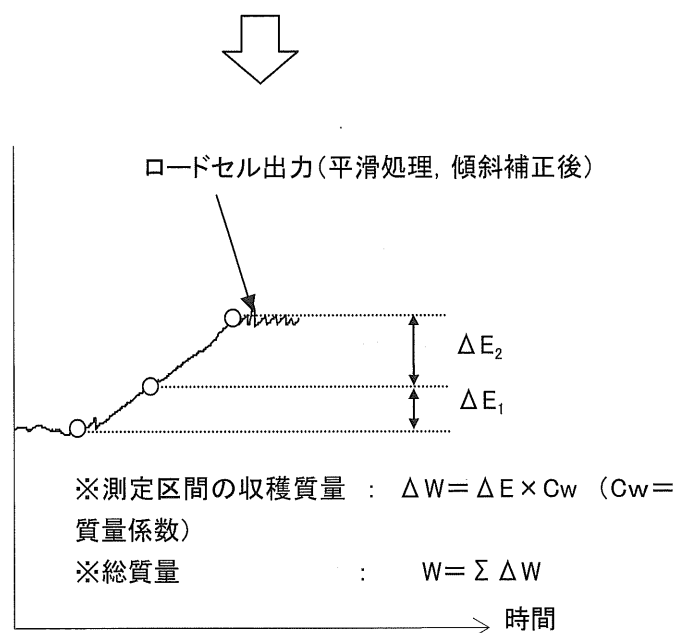
図3-10（その1） データ処理の流れ（質量データ）

③ロードセル出力と傾斜センサ出力を，それぞれ各測定ポイントの前後±10 秒間で単純平均して平滑化した後，傾斜補正を行う。

④隣り合う測定ポイントの計測値（傾斜補正済み）の差Δ E に質量係数 Cw を乗じたものを，Xmごとの各測定区間の収穫質量とする

図 3-10(その 2) データ処理の流れ(質量データ)

の差によって任意の区画の収穫質量を算出するため，ロードセルの厳密なゼロ較正は不要となった。

従来のセンサの多くが穀粒流量を測定しているのに対して，本収量測定機能付きコンバインは穀粒タンク内の全穀粒質量を連続して測定している。流量測定方式では総収量を計算するときに累積した誤差の影響を受けやすいが，本収量測定機能付きコンバインでは，圃場全体の収量は作業中の各測定ポイント間の差の合計とするため，誤差が累積することがない。また，開始時にタンク内に穀粒が残留している場合や，収穫作業の途中で穀粒排出作業を行った場合でも測定精度に影響を与えない（図3-11）。

水分データは，時間軸を同期させたデータをXmごとの各測定区間において単純平均して求めた。作業面積は，あらかじめ設定してある刈り幅（本試作機の場合は，4条＝1.2m）に，刈取りセンサが株元を検出し，収穫中と認識した全ての区間の速度と時間から算出される全作業行程の距離を乗じて算出して求める。

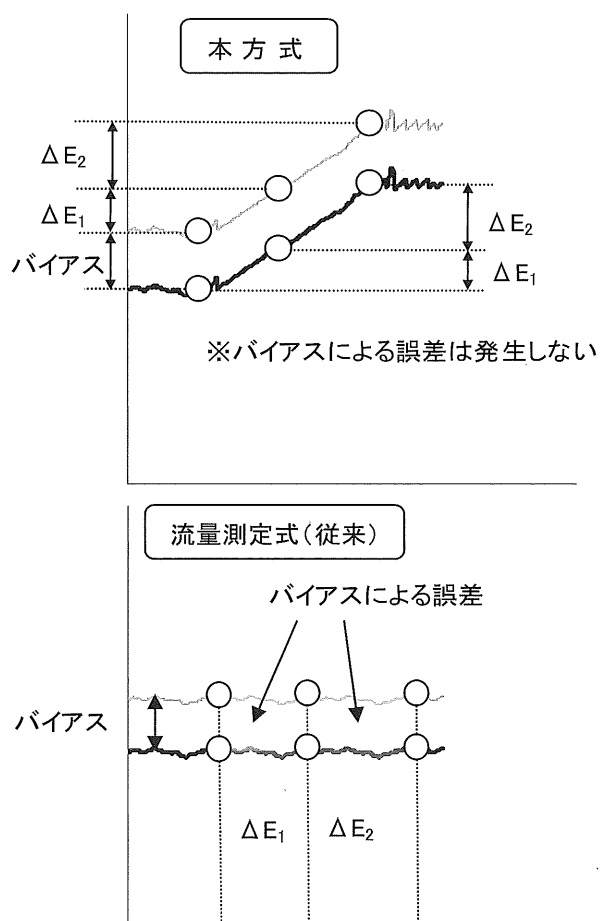



図3-11 センサのバイアスによる誤差

3.5.3 マップ作成

2001年試作機を供試し，農道ターン方式の回り刈り作業で小麦収穫を行い，試作機の制御・表示部のマップ作成機能を利用して質量マップ，水分マップ，10a当たり収量マップ（水分15％換算）を作成した（試験日：2002年6月12日，場所：生研センター附属農場，品種：農林61号）。

2001年試作機は，前項3.5.1で述べたとおり，GPSの位置情報を持たず，位置情報測定は収穫作業行程の認識および行程中の位置のみを測定することで行う。また，前項3.5.2で述べたように，設定したメッシュ区画に必要な計測ポイントのみデータ処理をするため，データ処理工程が簡易であり，マップ作成を高速に行うことができた。

2001年試作機によるマップ作成の手順は，次の通りである。まず制御・表示部のタッチパネル画面中の収穫情報ボタンを押して表示されるファイル一覧から，収穫年度と圃場番号により測定データを指定すると，まず，収穫した圃場の面積，収穫質量，水分値，収量などの基本情報が表示される。同時に画面には，質量マップ，水分マップ，収量マップを表示するためのボタンが表示され，それらを押すと各マップが作成，表示される。マップサイズや収量補正のための基準水分値，メッシュ表示か等高線表示かは，設定メニューにより選択できる。ファイル読み込みやマップ表示ボタンを押す作業と，必要に応じて幾つかの初期設定を変更する作業などを含めて，マップ作成表示までの所要時間は数秒であった。作成したマップの一例を図3-12に示す（マップは制御・表示部の画面で表示されるが，図にはマップ部分のみを抜粋して示す）。

以上，2001年試作機で測定したデータから，マップ作成を容易に行うことができた。

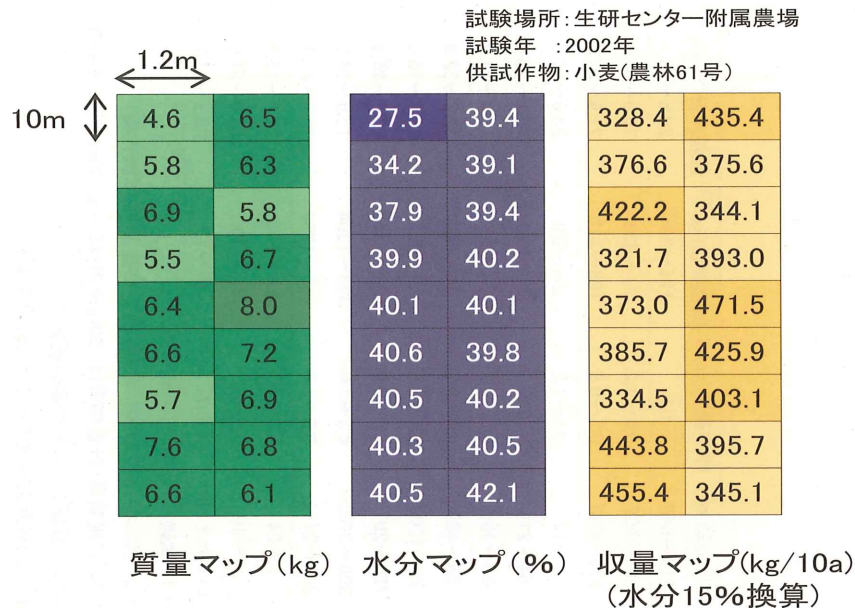



図 3-12　作成したマップの一例

第４章　開発システムの性能の検証

４．１　緒言

本章では，試作した収量測定機能付きコンバインの性能を検証するため，質量測定システム，水分測定システムの測定精度を検証した結果について述べる。特に質量測定システムについては，圃場一筆だけでなく，流量別，小区画ごとの検証を行った結果も報告する。また，一連の収穫作業を行い，マッピングシステムで作成したマップについても報告する。さらに，各システムの検証試験結果から明らかになった収量測定機能付きコンバインの特長を整理するとともに，残された技術開発課題についても述べる。

４．２　質量測定システムの検証試験

１）試験方法

2001 年試作機を供試して，実際に小麦，水稲を収穫し，測定値と真の収穫質量を比較して精度の評価を行った。なお，質量検量線は，前章３．３で求めた検量線，質量係数 C_W（小麦で C_W =0.260，水稲で C_W =0.300）を用いた。また，真の収穫質量は，計測終了後に収穫したタンク内の穀粒を排出し計量した値とした。なお，計量精度は，30kg 未満は 0.1kg，30kg 以上は１kg であった。

試験条件を表 4-1 に示す。①圃場一筆ごとの測定精度，②小区画メッシュごとの測定精度，③流量別の測定精度の３つの目的ごとに試験区を設定した。

圃場一筆ごとの測定精度試験は，GPS を使用しない位置情報測定部でマップ作成をするために，主に農道ターン方式での回り刈り作業で実施した。それ以外にも，通常の作業と同様に横刈りを含む回り刈り作業，隅刈りを含む作業，倒伏作物の収穫作業における測定も実施した。また，作業の中断，穀粒排出などは通常の収穫作業どおり必要に応じて行った。

小区画メッシュごとの測定精度試験においては，小麦の場合 6.0～12.0m²，水稲の場合 6.0～24.0 m² を収穫した時の測定誤差を調査した。

流量別の測定精度試験においては，刈取条数と作業速度を変えることにより，平均穀粒流量を小麦で 0.08 から 0.57kg/s（0.29～2.05t/h）まで，水稲で 0.08 から 0.79kg/s（0.29～2.84t/h）まで人為的に変

表 4-1 試験条件

作目	試験目的	日時[※1]	場所	品種	供試機[※2]	オペレータ	試験数	収穫面積(㎡)	作業速度(m/s)	収穫質量(kg)[※3]	穀粒水分(%w.b.)[※4]
小麦	検量線作成用	6/13	生研センター附属農場	農林61号	A	a	5	216～648	0.5	121～364	28.6～29.7
	ほ場一筆ごとの精度	6/14～20	生研センター附属農場	農林61号	A	a	28	54～1932	0.5～1.2	31～438	16.5～38.6
		6/15～19	生研センター附属農場	農林61号	B	a	8	216～648	0.5～0.8	108～415	21.5～33.6
	小区画メッシュごとの精度	6/15	生研センター附属農場	農林61号	A	a	12	6～12	0.5～1.2	2.8～6.0	23.6～37.4
	流量別精度※5	6/14	生研センター附属農場	農林61号	A	a	5	54～216	0.5	31～127	23.1～28.4
水稲	検量線作成用	7/28	高知県農家	コシヒカリ	A	b	6	24～480	0.5～0.9	13.0～288	14.0～21.0
	ほ場一筆ごとの精度	8/22～23	千葉県農家	ふさおとめ	A	c	10	96～480	0.4～0.7	41～423	20.2～32.9
		9/12～24	生研センター附属農場	コシヒカリ	A	d	4	72～1200	0.4～0.8	37～404	13.4～15.8
		9/25	生研センター附属農場	コシヒカリ	A	e	5	720～2079	0.5～0.8	506～1553	23.6～25.3
		10/5～19	生研センター附属農場	朝の光	A	d	11	300～2232	0.3～1.0	308～1304	15.6～34.3
		11/9	生研センター附属農場	ゆめみのり	A	d	6	308～2112	0.6～1.0	188～1290	15.2～16.1
	小区画メッシュごとの精度	11/9	生研センター附属農場	ゆめみのり	A	d	8	6～24	0.5～0.7	2.4～16.3	14.2～15.4
	流量別精度[※5]	7/28	高知県農家	コシヒカリ	A	b	5	24～96	0.5～0.9	13.0～70.1	14.0～21.0
		8/22	千葉県農家	ふさおとめ	A	c	2	いずれも96	0.7	41～77	20.2～21.3

※1　試験年：2002年（平成14年）
※2　供試機：A機（2001年試作機）、B機（2002年試作機）
※3　収穫質量：計量精度は、30kg未満は0.1kg、30kgを超えるもの1kg
※4　試験区ごとの平均値の範囲
※5　刈取条数や速度を変えて試験を実施

化させて質量を測定した。

小麦試験では，2001 年試作機に加えて，2002 年に新たに試作した収量測定機能付きコンバイン（以下，「2002 年試作機」と呼ぶ）の２台を供試した。2001 年試作機と 2002 年試作機は型式が同じ４条自脱コンバイン（㈱ヤンマー，GC 440）をベース機としているが，年式が異なるため，タンクの形状，支持構造が若干異なる。2001 年試作機と 2002 年試作機の質量測定部，水分測定部，位置情報測定部，制御・表示部はすべて同じ仕様であり，質量検量線，質量係数も同じものを利用した。

また，複数のオペレータが作業を行うことで，オペレータによる操作方法の相違による精度への影響も確認した。

２）試験結果および考察

圃場一筆ごとの質量測定精度試験の結果を，図 4-1，図 4-2 に示す。検量線作成時の小麦の５試験区，水稲の６試験区も同図にプロットした。精度試験の結果，小麦収穫，水稲収穫ともに，ほぼ９割の試験区が誤差５％以内（最大でも８％以内）であり，１ａ以上の区画を収穫した時の測定誤差が±５％以内という所期の目標精度をほぼ達成していた。さらに，小麦試験では，タンクの形状，支持構造が若干異なる 2001 年試作機と 2002 年試作機の両方を供試し，同じ質量検量線および質量係数を用いて測定を行ったが，図 4-3 に示したように高い精度の結果が得られた。また，水稲試験では 2001 年試作機のみを供試したが，穀粒タンク上部に質量約 10kg 程度の測定機器を搭載した場合（高知県農家圃場と千葉県農家圃場で実施した 16 試験区）と，搭載していない場合（生研センター附属農場で実施した 26 試験区）があった。このように穀粒タンクの重心が異なる条件下で，同じ質量検量線および同じ質量係数を用いても，高い精度が得られた。したがって，機差，機械条件の違いによる影響は小さいと考えられた。

さらに，2001 年試作機は 2002 年６月 13 日～2002 年６月 20 日の小麦収穫から，2002 年７月 28 日から 2002 年 11 月９日の水稲収穫まで，合計約５ヶ月間にわたり使用したが，その間，質量測定部の較正を行わなかったが，誤差が大きくならなかった（図 4-3）。以上のことから，供試した質量測定部は，収穫シーズン期間中の経時変化の影響は少ないと考えられた。また，横刈りや隅刈りを含む回り刈りを行った場合の圃場一筆ごとの質量測定誤差は，－5.3～－0.8％と小さかった（表 4-2）。なお，オペレータの違いによる精度への影響はなかった。

小区画メッシュごとの測定精度試験結果を図 4-4 に示す。小麦の場合，6.0～12.0 m²を収穫した時，水稲

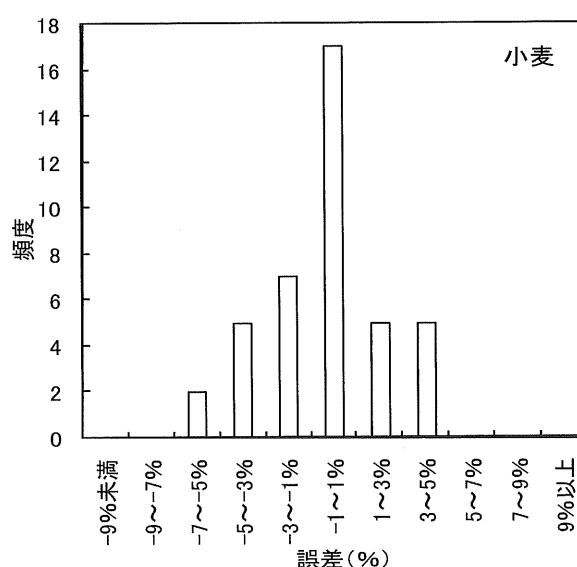
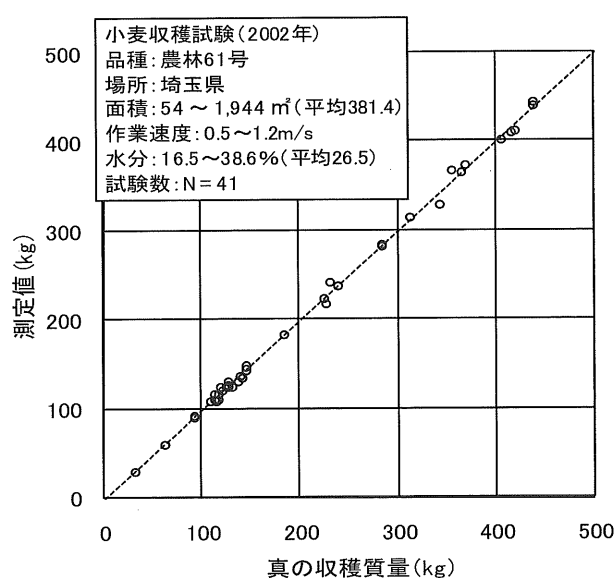



図 4-1　質量測定精度（小麦）

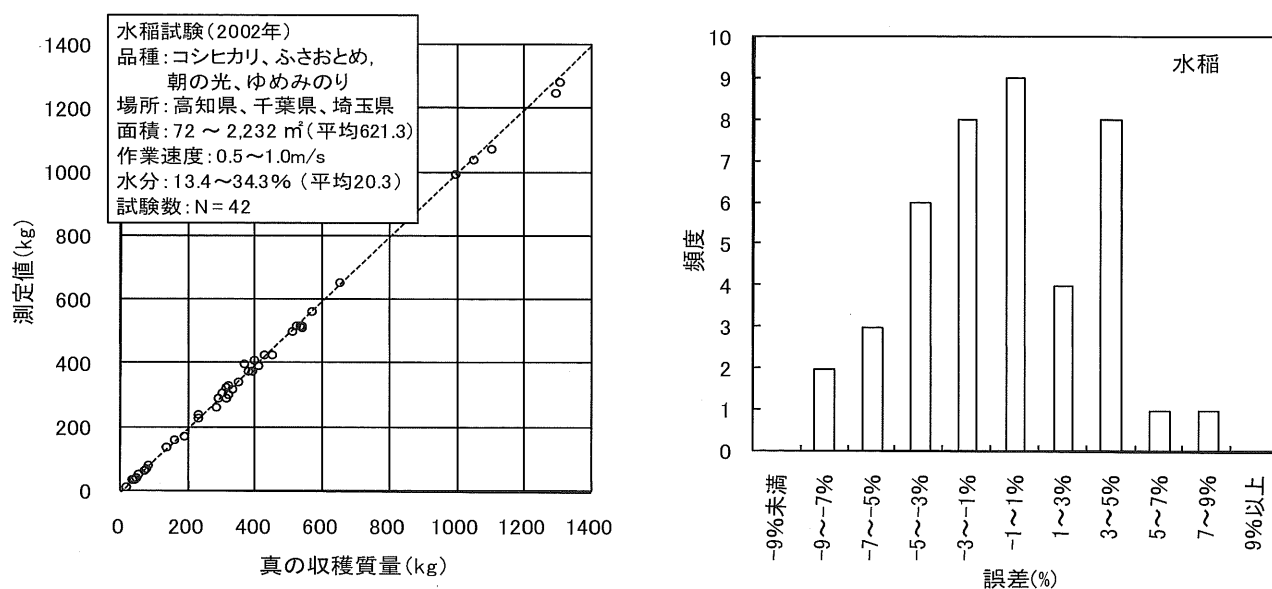



図 4-2 質量測定精度（水稲）

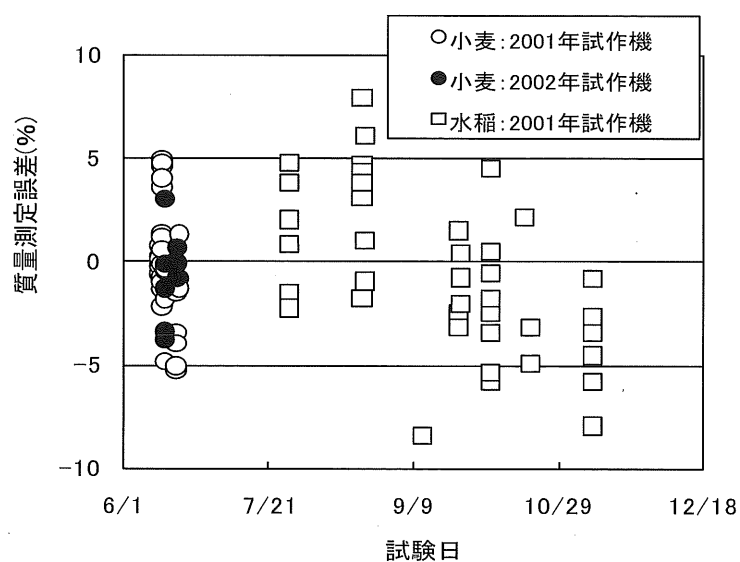



図 4-3 質量測定精度の経時変化

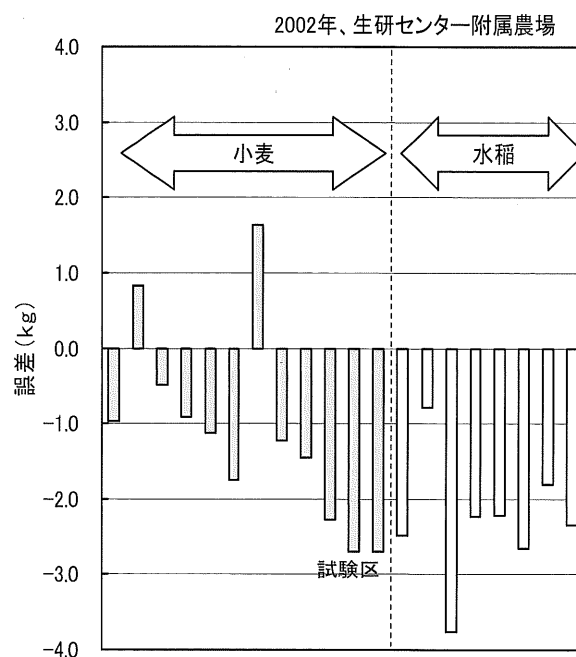



図 4-4 質量測定精度（小区画）

表 4-2 収穫質量測定精度（横刈り時，隅刈り時）

2002年、生研センター附属農場
水稲(コシヒカリ、朝の光、ゆめみのり)

作業内容	真の収穫質量(kg)	測定値(kg)	誤差(%)
横刈りを含む回り刈り	404	391	-3.1
	319	302	-5.4
	538	514	-4.5
隅刈りを含む回り刈り	564	559	-0.8

の場合，6.0～24.0 m² を収穫した時に，水稲，小麦ともに，誤差は概ね±３kg 以内であった。流量別の質量測定精度試験結果を図 4-5 に示す。誤差は５％以内であり，質量測定精度は高かった。したがって，穀粒流量の違いが区画ごとの収穫質量測定精度に影響を及ぼさないことが明らかになった。

次に，連続的な測定データを図 4-6 に示す。これを見ると，小麦，水稲ともに傾きと平均穀粒流量とに高い相関があり，全体として低流量の測定精度も高精度であることがうかがえる。しかし，小麦，水稲ともに平均穀粒流量が 0.08kg/s(0.29t/h)の場合はグラフが蛇行しており，測定が若干不安定であった。これは，測定上の誤差というよりもむしろ，極めて低い流量の場合にタンク内に投入される穀粒量が安定しない(コンバイン内の穀粒の流れが安定しない)ことが原因と考えられた。これらは現行のコンバインの構造に起因するものである。本例は作業速度 0.5m/s で１条のみを収穫した場合であるが，それでも若干データが不安定になったのみであったことから，通常作業と著しく異なる作業を行わなければ，測定精度に及ぼす影響は小さいと考えられた（なお，小麦の 0.08kg/s のグラフは質量値が減少する部分もあるが，これはセンサの誤差に起因するものであるが，最大でも 300g 程度であった)。

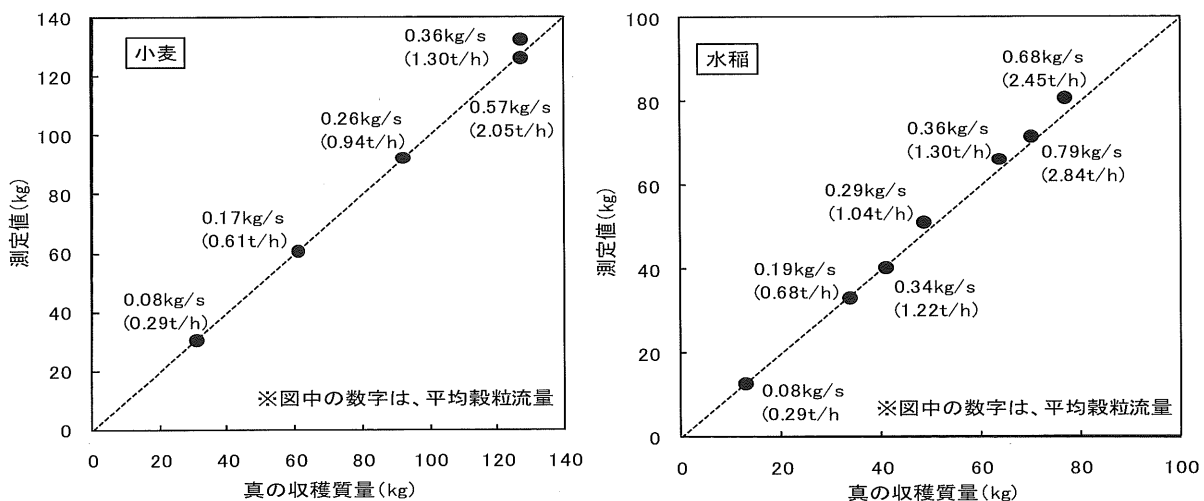



図 4-5　質量測定精度（流量別）その１

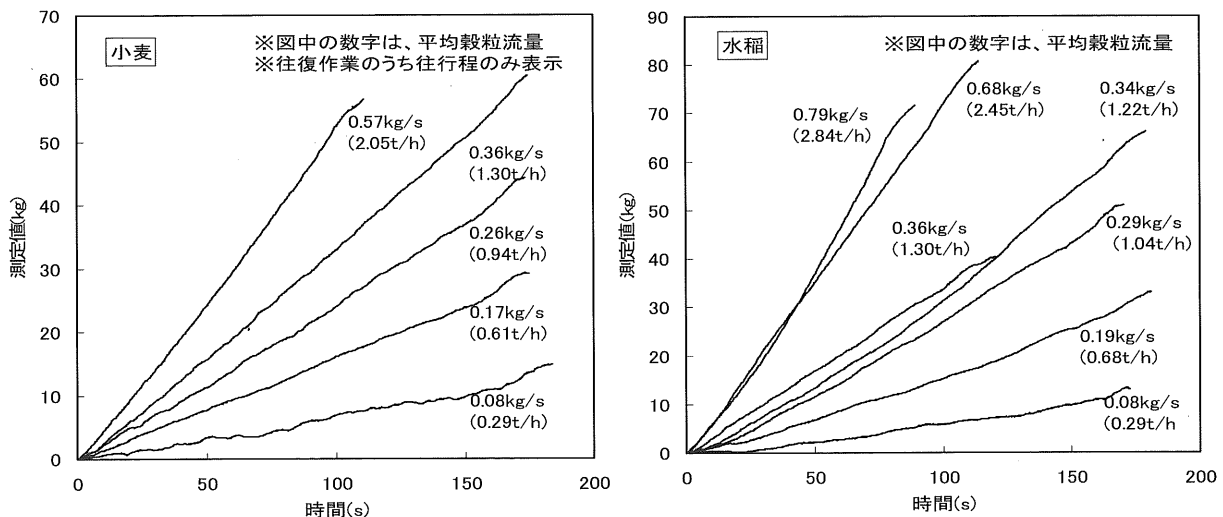



図 4-6　質量測定精度（流量別）その２

４．３　水分測定システムの検証試験

１）試験方法

圃場において水稲，小麦の収穫作業を行い，水分測定部のサンプリング状態を観察するとともに，測定精度を測定した。精度評価は，水分測定部で計測した後の圧砕された穀粒サンプルを 10 秒ごとに回収し，常圧定温乾燥法（105℃，24 時間）で水分を求め，測定値と比較した。圧砕されたサンプルの回収は，タンク内に人が入って 10 秒ごとに回収したため，本試験は，質量測定精度試験とは別に行った。試験条件は，水稲（品種：コシヒカリ，ふさおとめ，朝の光，ゆめみのり，作業速度：0.5～1.0m/s），小麦（品種：農林 61 号，作業速度 0.5～1.2m/s）であった。

２）試験結果および考察

水稲および小麦の品種，水分条件，作業速度，穀粒流量に関わらず，円滑にサンプリングを行い，連続的に測定を行うことができた。水分測定精度を，図 4-7 に示す。小麦（試験水分範囲：14.7～35.8%）で相関係数 r =0.98，予測標準誤差 SEP=1.28，水稲（試験水分範囲：17.2～32.3%）で相関係数 r =0.99，予測標準誤差 SEP=0.98 であり，高い精度で測定できた。また，作業速度や品種の影響はなかった。15～35%程度の水分測定範囲において，予測標準誤差で水分１%以内という所期の目標精度を得た。

４．４　マッピングシステムの検証試験

１）試験方法

質量測定精度を評価した試験（表 4-1）のうち，試作した制御・表示部でマップ作成が可能な農道ターン方式の回り刈り作業をした試験区の小麦 25 試験区，水稲 29 試験区について，収穫後に質量マップ，水分マップ，水分 15%換算した 10 a 当たりの収量マップの３つのマップを作成した。メッシュサイズは，それぞれ 1.2m（４条）×10mとした。なお，掲載するマップは誌上での見易さを考慮して，制御・表示部で作成した実際のマップとはレイアウト，色を変更してある。

２）試験結果および考察

いずれの試験区でも，収穫作業後に各マップを作成できた。マップ作成の所要時間（測定データの呼び出し操作からマップを表示するまで）は，十数秒間であった。

水稲（場所：生研センター附属農場，面積：2,100 m^2，品種：コシヒカリ）を収穫して作成したマップの一例を図 4-8 に示す。水分マップでは水口側が高水分の傾向にあり，質量マップでは水分換算をしていないため，水分ムラの影響を受けて水口側の質量が大きい傾向を示し，比較的ムラが大きいマップとなっている。しかし，水分 15%換算した 10 a 当たり収量マップで

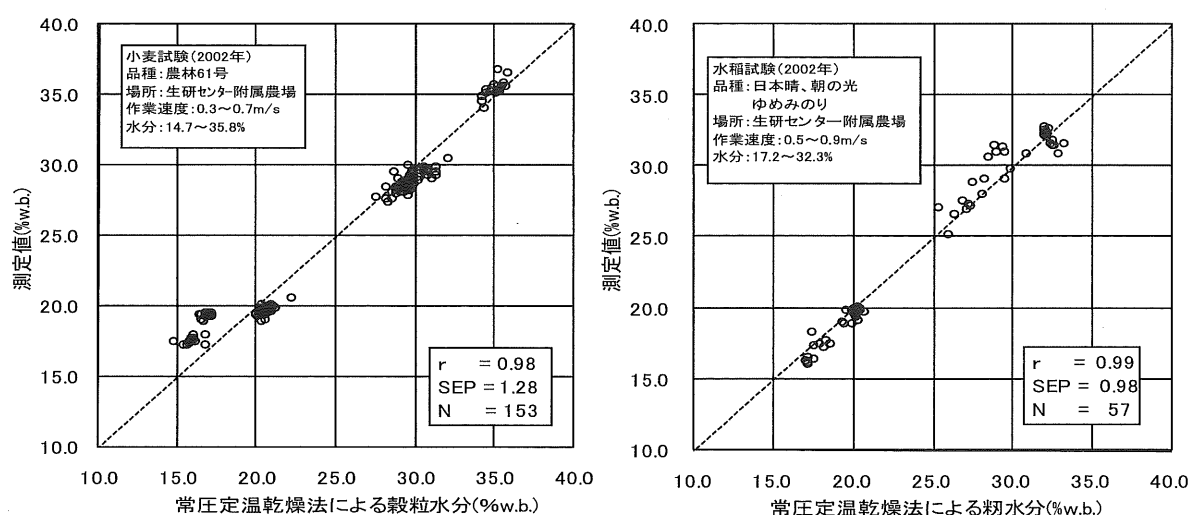



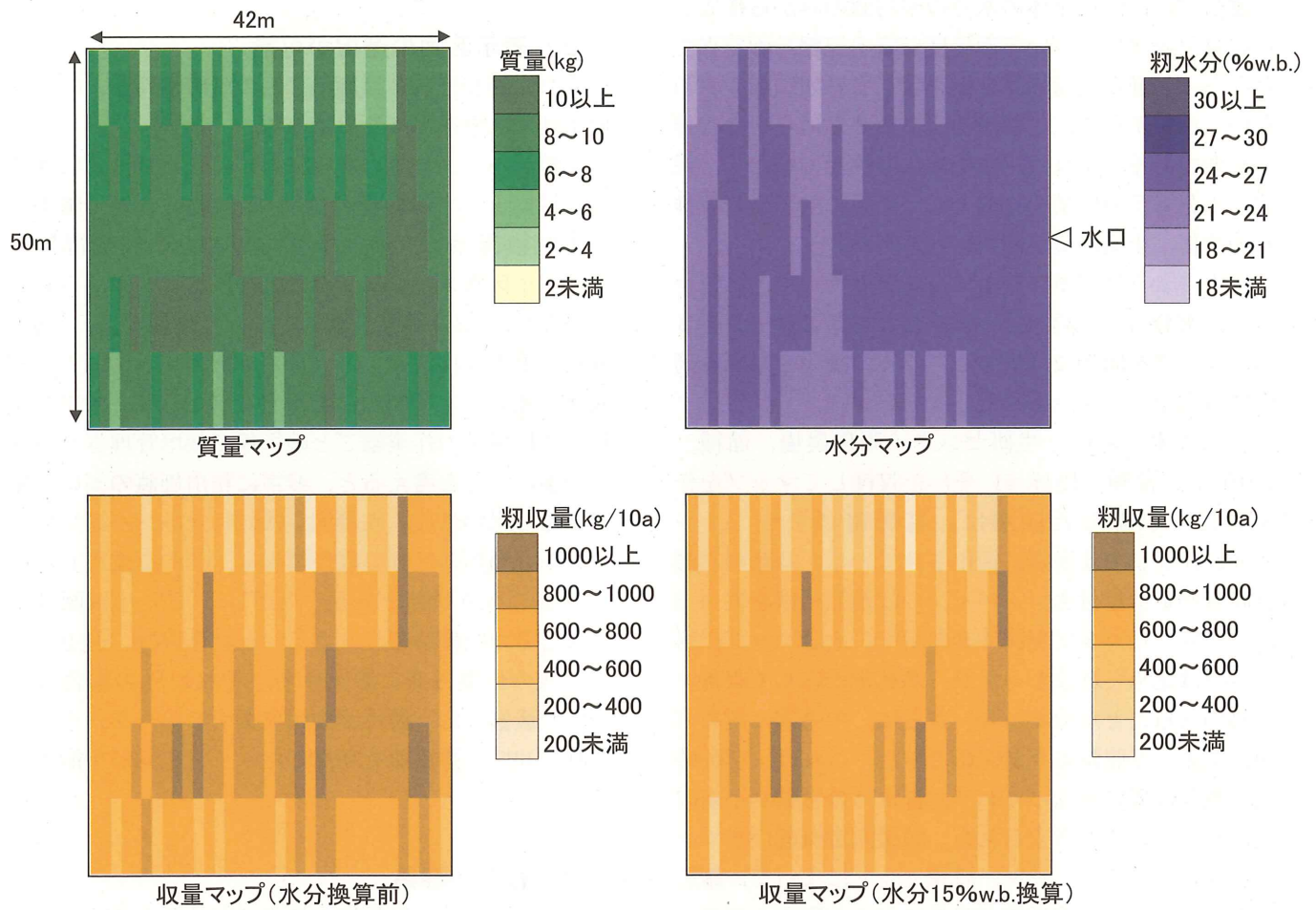
図 4-7 水分測定精度試験結果

		真の値	測定値
収穫面積(㎡)		2080	2070
収穫籾質量(kg)		1553	1541
籾水分(%)	平均	－	24.3
	最大	－	26.9
	最少	－	18.5
籾収量(kg/10a) 水分15%w.b.換算		－	662

図 4-8 収量マップ（水稲）

は，中央部に若干高収量のメッシュが存在するのみで，収量ムラがそれほど顕著ではない。仮に水分の変動を考慮せずに，圃場全体の水分の平均値のみから作成した収量マップに基づいて次年度以降の施肥計画を立てたならば，逆に収量ムラを引き起こす原因になりかねない。したがって，この試験区に敢えて何らかの改善が必要であるとすれば，施肥方法の改善ではなく，穀粒の水分ムラの解消を目的とした圃場の均平や暗渠排水の改善，土壌改良を検討すべきであろう。

以上のように，単に質量マップだけでなく，水分マップ，水分 15%換算した 10 a 当たり収量マップの３つのマップを同時に解析することで，圃場の評価を適切に行えることが示された。

次に小麦（場所：生研センター附属農場，面積：1,940 m^2，品種：農林 61 号）を収穫してマップを作成した。供試した圃場は，基肥窒素量を 2.0～8.0kg/10 a まで４段階に変化させている。基肥窒素量と収量測定機能付きコンバインの収量測定値を表 4-3 に，作成したマップを図 4-9 に示す。水分マップに水分ムラは認められなかったが，基肥量に応じて収量に差異があることが分かった。さらに，中央部に斜め方向に交差する収量ムラが確認できた。これは，籾殻暗渠の敷設位置と重なっており，排水性の影響が小麦収量に及んでいると考えられた。収量測定機能付きコンバインによる水分マップ，収量マップによって，施肥管理作業以外の管理作業が収量に与える影響も評価できることが明らかになった。

４．５　システムの特長と今後の課題

開発した収量測定機能付きコンバインの各システムの検証試験結果から明らかになった収量測定機能付きコンバインの特長を整理するとともに，技術開発課題の抽出を行う。

４．５．１　システムの特長

１）質量と水分の同時測定

第１の特長は，収穫作業において穀粒の質量と水分を同時に連続測定できる点である。

開発したシステムは，我が国においては，水稲や麦類の収穫に広く利用されている自脱コンバインの性能を維持したままで利用できる収量センサや水分センサ，GPS を使用しない簡易な位置情報システムから構成されており，収穫作業において穀粒の質量と水分を同時に連続測定し，収穫後にはマップ作成ができる収量測定機能付きコンバインである。

２）表示区画の選択が可能

第２の特長は，３種類の区画の収穫情報を，GPS を使用せずに取得できる点である。

比較的小さい日本の水田において利用できる収穫情報の区画としては，優先度の高い順に，「Ａ：圃場一筆の収穫情報」，「Ｂ：作業行程ごとの収穫情報」，「Ｃ：小区画メッシュごとの収穫情報」が挙げられる。そのうち，「Ｂ：作業行程ごとの収穫情報」は，「Ａ：圃場一筆の収穫情報」と「Ｃ：小区画メッシュごとの収穫情報」との中間的な情報とも言えるが，水田では特に使用機械の作業幅ごとの行程で栽培管理される場合が多いことを考えると，非常に利用価値の高い情報であると思われる。収量測定機能付きコンバインは，これら３種類の区画の収穫情報を，GPS を使用しないで得ることが可能である。ただし，「Ｃ：小区画メッシュごとの収穫情報」によるマップ作成は，農道ターン方式の作業方式に限られる。それ以外の場合は，GPS を装備した「農用車両用作業ナビゲータ」を接続すればGPS位置情報を利用したマップ作成が可能である。

３）較正が容易

第３の特長は，検量線の較正が容易な点である。

質量測定部について，欧米における衝撃式などの収量センサでは，収穫シーズン前に較正を高精度に行う必要があり，必要に応じて収穫シーズン中にも数回行う場合もある。その方法は，実際に数行程を収穫し，収穫物の実収量を測定し，ゼロ較正および質量係数の補正といった検量線の修正を行う[2) 95) 96) 97)]。例えば，Ag Leader 社が市販している収量センサにおいて推奨される収量センサの較正方法は，低，中，高流量で非線形の検量線を作成するもので，１シーズンに３回から４回の較正を行えば高い質量測定精度が得られる[98)]。しかし，日本国内では，欧米方式のような較正を行うには，圃場面積が小さく，収穫時期も短いため，非効率的である。それに対して，本研究で開発した収量測定機能付きコンバインは，３．５．２で述べたように，データ処理方法の特色からゼロ較正を厳密に行う必要がないことが利点として挙げられる。測定精度試験を実施したタンク構造の異なるコンバイン２台ともに同じ検量線を用いた結果，2001 年試作機は，

表 4-3 試験区ごとの基肥Ｎ量

試験区	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
基肥N量(kg/10a)	7.0～8.0	2.0	4.0	6.0
測定した収量(kg/10a)	276	125	184	257

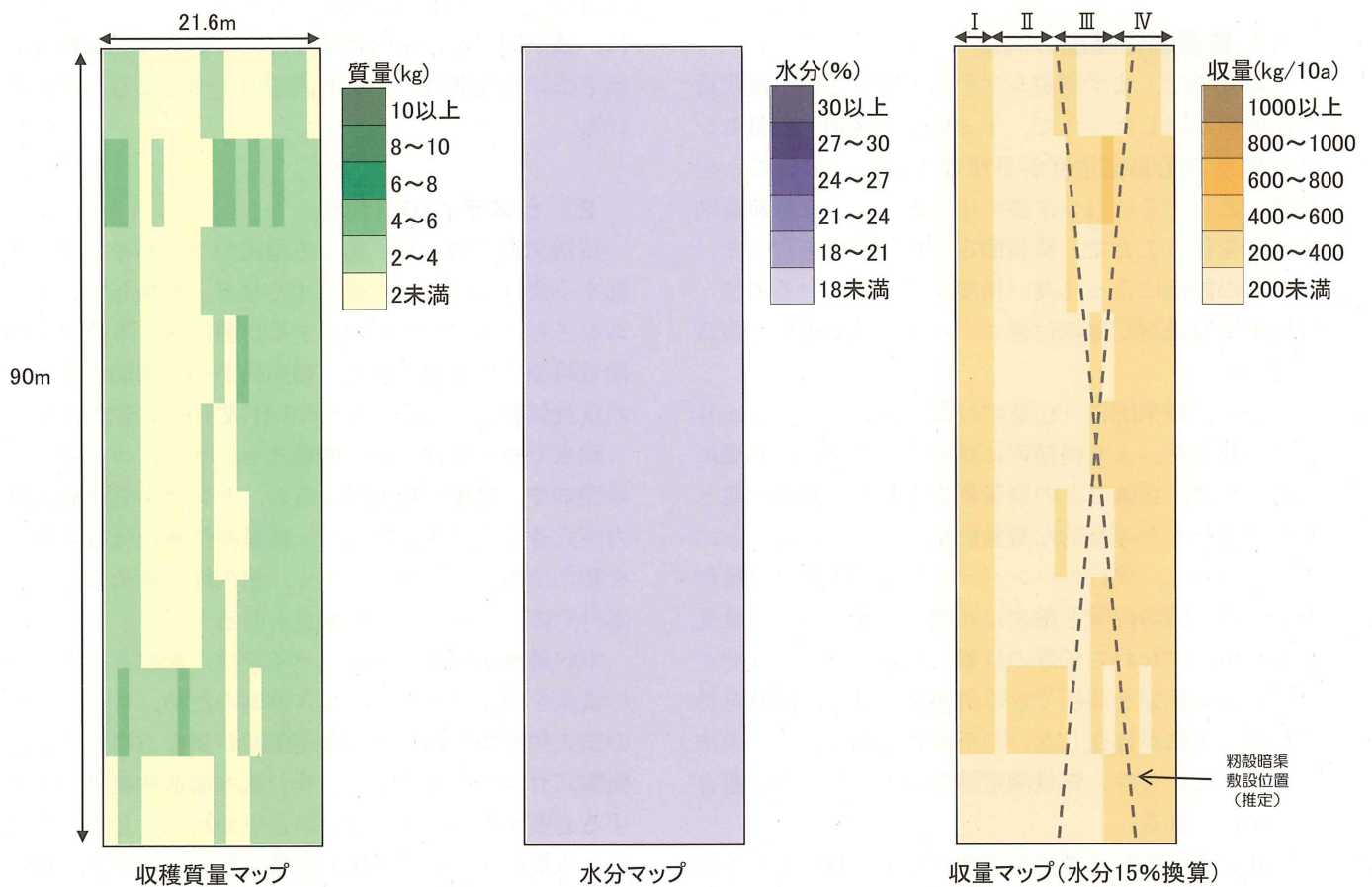
2002年、生研センター附属農場

		真の値	測定値
収穫面積(㎡)		1933	1932
収穫質量(kg)		415	402
水分(%)	平均	－	16.8
	最大	－	17.5
	最少	－	15.4
籾収量(kg/10a) 水分15%w.b.換算		－	203

図 4-9 収量マップ（小麦）

2002 年 6 月から 11 月までの間，水稲，小麦の質量係数 C_W の修正を行わなくても所要の精度が維持できたため，検量線の管理が比較的容易であった。

水分測定部の検量線の原理は，穀物乾燥機の水分計と基本的に同じであるので，それらで一般に行われている較正のノウハウが活用できる。穀物乾燥機の場合は，通常は収穫シーズン前などに年 1 回程度，基準サンプルによる較正を行えば良く，較正が容易である。

４．５．２　今後の課題

１）質量測定精度の向上

本研究では，まず測定システムに要求される測定精度を明らかにしたうえで，１ａ以上の区画で収量センサの収穫質量測定精度が目標の±５％であることを検証した。さらに 1a 未満の小区画メッシュや流量別の測定を行うことで，質量測定の精度評価を行った。これらの評価によって高い精度が得られているので，現段階で収量測定機能付きコンバインは実用的であると言える。

しかし，将来的に「任意の位置，任意のメッシュサイズの収量を，より高精度に測定すること」が必要になるならば，区画ごとの質量測定よりも，圃場位置と厳密に連動した連続的な質量測定が重視されることになる。しかし，現行のコンバインによる実際の収穫作業下では，圃場位置と厳密に連動した連続的な質量変化の真値，すなわち任意の位置，任意のメッシュサイズにおける測定を評価できる信頼性の高い基準値を得る最適な手法が存在しないのが現状であり，この手法を確立することが，質量測定精度向上のための課題として挙げられる。

実際の圃場の収量変化を全刈りせずに測定する手法として，坪刈りによる収量マップ予測を行い測定値と比較するという方法が考えられるが，Kettle と Peterson が指摘するように，非常に小さい区画の場合，区画内での坪刈りからの収量予測そのものが，必ずしも正確であると言えず，またサンプリング量を多くすれば，コンバインで収穫する収量あるいは流量が小さくなるなどの弊害も生じる[24]。

もし，これらの課題を解決でき，基準値となる真の収量測定が任意のメッシュサイズで実現できれば，さらに高度な収量測定システムの評価，開発が可能になると考えられ，また，マップ精度に影響を及ぼす時間遅れの解明などにも利用できる。したがって，実際に必要とされる収量マップの精度，形態の研究とともに，今後検討するべき課題と思われる。参考までに，米国では現在，American Society of Agricultural and Biological Engineers（ASABE）において，収量センサの測定精度試験方法が策定されている（ASABE S578 JAN2007）。それに基づいて，Burks らや Loghavi と Ehsani が，一番揚穀エレベータを流量可変の穀粒供給装置として利用して行い，市販の収量センサの流量別の精度評価の室内試験結果を報告している[42) 99) 100)]。その他，収量センサの室内試験装置を，Kormann ら，Arslan と Colvin らが報告している[25) 101)]。このように，我が国でも，室内試験などによる合理的な精度評価方法の研究開発が，重要課題の１つであると考えられる。

２）システムの汎用化

質量測定に関して，異なる型式のコンバインや，水稲や小麦以外の作物に適用するなど，開発したシステムをさらに汎用的なものとするためには，本研究での検量線開発の手法よりも，効率的かつ汎用的な検量線の質量係数 C_W や傾斜補正式の作成手法が望まれる。

欧米で利用されている衝撃式センサは，コンバインの型式や，対象作物が異なると，センサが受ける衝撃力が大きく変動するために，検量線や穀粒受板の形状を新たに開発するだけでなく，耐久性を高めるために素材そのものを変更する場合もある[2)]。

本収量測定機能付きコンバインは，穀粒タンク全体の質量を測定するというシステムのため，コンバインの型式や対象作物などの測定条件が異なる場合でも，衝撃式センサのようにセンサの基本構造や素材を変更する必要がないと考えて良いと思われる。しかしながら，水稲と小麦の２種類の質量係数を設定する必要があることからも分るとおり，測定条件に適した検量線の作成は必要であり，そのためには，実際の収穫作業下での測定を最小限にする，検量線の効率的作成手法の開発が必要である。また，前述したように本研究では，測定精度試験を実施した 2002 年 6 月から 11 月までの間，水稲，小麦の質量係数の較正を行う必要がなかったものの，さらに複数年にわたり使用した時の経年変化により検量線を更新する必要が生じる場合を含めて，簡易な検量線較正法の開発が今後の課題であると思われる。また，水分測定に関して，水稲や小麦以外の穀物，例えば大豆などの大粒の穀粒を測定する場合には，新たな水分センサの開発が必要である。

3）精密農業の技術パッケージ化の過程における再評価

精密農業研究の最終段階の形として，それぞれの営農戦略が目的とする機能を発揮するように個々の要素技術を結合させる「要素技術のパッケージ化」がある[102)]。精密農業の要素技術は，圃場マッピング技術，意思決定支援システム，可変作業技術の３つの要素技術に分類される[10)]。それぞれの営農戦略の中で選択された個別の技術要素が，精密農業技術のシステム全体の中で再評価されることが必要である。すなわち，可変作業技術などの他の技術要素に利用できる情報や，経営判断の指標となる情報を得るために，収量マップが土壌マップや生育マップなどの精密農業のキーとなる圃場マップと結合される過程において，収量測定機能付きコンバインの機能や精度などが改めて評価されることが必要となる。

第５章　総括

生研機構（現：生研センター）では，「21 世紀型農業機械等緊急開発事業」（略称：「21 緊プロ」）で精密農業の要素技術としての機械・装置を開発した[4) 5)]。21 緊プロにおける精密農業用機器開発の１つとして，収量測定機能付きコンバイン（以下，収量コンバイン）の研究開発を 1998 年度から 2002 年度まで実施した。

研究開発期間終了後，2003 年度から 2006 年度までの４年間，生研機構（現：生研センター）が中心になって，生産者，県の農業試験場，大学，メーカらと共同で，21 緊プロで開発した精密農業関連の機械・装置を利用した「日本型水稲精密農業（ＰＦ）実証事業」（以下，「ＰＦ実証事業」）を実施した。ＰＦ実証事業では，作物生育情報測定装置による生育情報や収量コンバインよる収量情報，個別圃場の土性，水利条件，農作業や投入資材などの情報データを情報センターで圃場１筆ごとに管理し，農業者の経験，営農指導者や土壌の専門家により施肥設計を行い，可変施肥機によって可変施肥管理を行うことによって，品質の向上，生産コストの低減，環境負荷の低減などを実現する技術として機能することを検証した。高品質な米生産を目指す大規模な生産組合と，受託を含めると 45ha を超える国内最大級規模の個人経営農家の２つの営農体系において，想定した経営モデル別の機器利用における実証試験を行った。ＰＦ実証事業では，圃場１筆毎に，施肥，生育量，収量さらには種々の作業情報を蓄積し，それらの情報をもとに行う管理を「広域管理」と呼び，本実証試験の中心に位置づけているが，「農用車両用作業ナビゲータ」を利用して圃場内のばらつきを管理する「局所精密管理」についても，技術の蓄積を目的とした実証試験を行っている。ＰＦ実証事業は，生研センターが開発した機械・装置の導入を中心にして，大規模な水稲営農における精密農業を体系的に実証するものであった[103) 104) 105)]。

ＰＦ実証事業の中では，収量コンバインを水稲収穫に使用しており，2003 年の 10ha から，最終年の 2006 年には約 100ha（500 筆弱）で稼動した。５年間の実証試験の結果，１筆ごとの圃場の質量測定誤差は全て±５％以内であった。また，収量コンバインを実際に利用した農家からは，年々使う度にその必要性を実感したという感想や，市販コンバインに標準装備をしてほしいなどの要望があった[106) 107) 108)]。また，同実証事業の「局所精密管理」において，農用車両用作業ナビゲータと収量コンバインを接続して，GPS による位置情報を利用した収量マップを作成している。7.5 m×10～30 m の小区画ごとに，土壌調査結果に基づく可変施肥管理を行い，収量と品質のばらつきを低減できた[109)]。ＰＦ実証試験全体では，「広域管理」「局所精密管理」ともに，収量のばらつきや品質のばらつきが減少し，品質の安定した米作りに効果があったことに加えて，化学肥料投入量を削減するなどの成果を得ている。そのほか，実証試験を行った農業者の米作りが周囲に評価されて米の販路が拡大されたり，実証試験を受託した生産組合が地元の酒造業者と連携した米作りへの模索を開始したりするなど，情報を利用した営農戦略に１歩踏込んだ成果が得られ，開発した精密農業用機械・装置の実用化に関する貴重な成果を得ている[103)]。

新農業機械実用化促進株式会社は，収量コンバインの実用化（市販化）に対するアンケート調査を普及担当者や生産者を対象に行った。その結果，収量コンバインを利用したい場面として，「収穫作業受託時の情報管理」39%，「営農指導の参考」33%，「水稲の生産管理」32%，「共同乾燥施設の業務管理」27%という回答が寄せられている。なお，「利用したいと思わない」は，わずか9%であった[110]。

Ashcroftは，英国農家の「10年前にGPS付きの収量モニタを購入したが，メーカを儲けさせるだけで，投資に見合った利益が出ないのではと思っていた。しかし，収量マップを10年間蓄積してやっと可変施肥を検討するに至った。」という言葉を紹介している[111]。精密農業における可変管理などが実際に実行に移されるには長期間のデータの蓄積が必要であり，今後の精密農業研究の「要素技術のパッケージ化」の段階において，さらなる実証試験や取組み事例の蓄積と評価が必要不可欠である。

精密農業は，先進的な機械・装置の利用という点を除けば，ある意味ではこれまでの伝統的な日本農業の姿であると言うこともできる。中国の伝統的農業思想の中に「精耕細作」という，読んで字のごとくきめ細かく丹念に耕作するという思想があり，江戸時代に記された農書などを見ると，我が国の農業にも少なからずこの農業思想が浸透している[112]。また，守田は，初期の明治政府が起用した「老農」と呼ばれる篤農家たちの座談会記録の紹介を交えながら，畑では土つくりと作付け区分の配置，嫌地（いや地）を熟慮した輪作体系，水田では，耕うん，水の掛け引き，施肥，品種の選択など，複雑で豊富な農法の上に成り立つ農業と，量や質を限りなく直進的に拡大し続ける工業とを明確に区別している[113]。きめ細かく，丹念に耕作するということは，多様性の上に成り立つものである。しかしながら同時に守田は，一見緻密に計算されたかのように見える多様性は，それが歴史的に生活のためにそうせざるを得なかったということであることにも言及しており，同時にその限界も指摘している[113]。

現代の農業は，このような伝統的な「精耕細作」という思想を継承している一方で，山岸が述べたように，「大型機械化による圃場の均一管理，施肥量の増大，多肥条件に対応する品種改良，農薬使用量の増大などによってさまざまな悪条件を取り除き，高収量をあげるように進んできており，たとえば肥料に関しては，圃場間あるいは同一圃場内には土壌の肥沃度の差による空間的な収量のばらつきや変動があるが，過剰な肥料を一律に施用することによってそれらのばらつきを覆い隠している[114]」という一面を持っている。我が国の農業は，世界に誇るべき高品質を維持しつつも，さらなる国際競争力を求められる厳しい農業事情の下，伝統的農業技術と近代的農業技術のバランスをとりながら，世界に比して非常に多様で精密な農業生産を行っている。加えて，日本列島の気候や地理条件も多様であり，おのずと地域ごと，作物ごと，気候ごとに対応した農業技術を，長い年月をかけて農家や研究者らが築き上げてきているとも言える。

最近では，品質に対する消費者ニーズが高いため，コスト低減のみならず，高品質生産に向けた様々な営農戦略が展開されている。それらのことから我が国の農業の特色は，まさに多様性にあるといっても過言ではない。このような我が国の農業において，ばらつきを単なるばらつきとするだけでなく，我が国農業の特色である多様性というものに着目して情報を整理するとともに，その多様性については，むしろ積極的に利用することによってメリットを生み出す可能性を追求していくことが重要である。そして，精密農業の技術要素である収量コンバインが実際に営農現場で利用され，収穫情報が蓄積されることは，まずはその多様性を，収量という一面ではあるが，より具体的に捉えるきっかけとなり得るであろう。そして，土壌情報や生育情報などの圃場情報などと有機的に結合することによって，さらには「精密農業日本モデル」の技術要素として営農戦略体系に組み込まれていくことによって，想像されるよりも大きな価値が創造されるであろうし，またそのことを期待してやまない。

最後に本研究を以下に総括する。

5.1 基本設計と供試コンバインの試作

要求される測定精度の基礎的な検討を行った後，開発機の全体構成および各測定システムの基本設計，自脱コンバインに搭載して連続測定できる電気抵抗式の穀粒水分センサについての要素技術開発を行った。また，それらに基づいて供試コンバインの試作を行った。

1）収穫時の水稲の収量や水分の調査を行い，収量コンバインに要求される精度の基礎的な検討を行った結果，収量測定においては，１a以上の区画を収穫した時の測定誤差が５%以内であることを目標と定めた。また，水分測定範囲は15～35%程度と定め，測定精度は予測標準誤差で水分１%程度以内と目標

を定めた。

2）開発機は，質量測定部，水分測定部，位置情報測定部，制御・表示部を有する自脱コンバインとした。質量測定部は，コンバインのタンクの一端を支持するロードセルへの荷重を傾斜センサの利用により傾斜補正し，タンク内の穀粒の全質量を測定する方式とした。水分測定部は，電気抵抗式水分計（複粒式）とし，タンク内に拡散された直後の籾をサンプリングして測定する方式とした。本研究では位置情報測定部，制御・表示部は，GPS を使用しない簡易式のものとしたが，生研センターが開発した GPS 利用の農用車両用作業ナビゲータの利用が可能となるシステムとしている。

3）水分測定部について，要求されるサンプリング量を確保するとともに，従来の電気抵抗式水分センサの検量線を準用できる新たなローラ電極を有する水分センサの開発を行った。室内において高水分籾の測定精度試験を行った結果，予測標準誤差（SEP）は 0.55 であり，約 30％の高水分域においても，測定値が飽和したり，出力がばらついたりすることなく，非常に高い精度で測定できた。

4）基本設計に基づいて収量コンバインを試作し，実際の収穫作業下で測定したところ，質量，水分，位置情報ともに連続測定することができた。

5．2　測定システムの開発

収量コンバインの測定精度に関わるシステム開発として，時間遅れ補正方法の検討，質量測定部のロードセル出力の傾斜補正式および検量線の作成，GPS を利用しない簡易な位置情報測定の精度確認などを行った。また，収量コンバインでマップを作成した。

1）時間遅れに関して，刈取りセンサの状態が変化した時点から，質量測定部や水分測定部の出力が変化するまでの時間を測定した結果，質量測定，水分測定について，ともに約 15 秒であった。本研究では，複雑な時間遅れ補正を行わず，実用的なデータ処理方法の一つとして，時間遅れを一律に処理する方法を採用した。時間遅れの補正値としては，質量測定部および水分測定部の測定データから求めた時間遅れの最頻値と観察結果において共通的だった 15.0 秒を採用した。

2）質量測定部のロードセル付近に設置した傾斜センサによる傾斜補正によって精度が向上した。実際に収穫を行い，質量測定部の検量式を求めた。その結果，水稲，小麦ともに相関係数 r =0.99 以上の検量線が得られた。

3）位置情報測定部は，実際の収穫作業下で，90m程度の距離に対して，１m以内の精度で測定できた。

4）収量コンバインで小麦を収穫し，質量マップ，水分マップ，10ａあたり収量マップ（水分 15％換算）を容易に作成できた。

5．3　開発システムの性能検証

試作した収量コンバインの性能を検証するため，質量測定システム，水分測定システムの測定精度を検証した。特に質量測定システムについては，圃場一筆だけでなく，流量別の検証，小区画ごとの検証も行った。また，一連の収穫作業を行い，マッピングシステムで作成したマップについても考察した。さらに，各システムの検証試験結果をもとに，収量コンバインの特長および今後の課題について整理した。

1）質量測定部については，小麦収穫時，水稲収穫時ともに，ほぼ９割の試験区が誤差５％以内（最大で８％以内）であり，所期の目標精度を達成していた。また，作業速度に関わらず高い精度であった。さらに，どのような収穫方法で作業しても，ほ場１筆の測定精度は高かった。1ａ未満の小区画メッシュの測定では，小麦，水稲とも，誤差が概ね±３kg 以内と小さかった。

2）水分測定部については，水稲で相関係数 r =0.99，予測標準誤差 SEP=0.98，小麦で相関係数 r =0.98，予測標準誤差 SEP=1.28 であり，作業速度や品種によらず高い精度で測定できた。

3）農道ターン方式の回り刈り作業をした試験区について，マップ作成が容易にできた。また，収穫質量マップ，水分マップ，水分 15％換算した 10ａ当たりの収量マップの３つのマップを同時に解析することにより，ほ場の評価を適切に行えることが示された。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、研究環境を整えて下さった旧生物系特定産業技術研究推進機構（現生研系特定産業技術研究支援センター（生研センター））の菅原敏夫元理事，木田滋樹元理事，生物系特定産業技術研究支援センター（生研センター）の大森昭彦前理事，また研究報告のとりまとめの機会を与えて下さった竹原敏郎理事に心より謝意を表します。

本研究の取りまとめにあたり，生研センターの津賀幸之介元所長，朝比奈清前所長，曾根則人所長，行本修企画部長、後藤隆志基礎技術研究部長から暖かい励ましを頂きました。深く感謝します。

本研究のとりまとめに，生研センター生産システム研究部の澁谷幸憲元主任研究員，日髙靖之主任研究員，梅田直円主任研究員，栗原英治研究員に御助言を頂きました。また，同部収穫システム研究単位の故渋谷次雄氏，野口俊輔元特別研究員，福田覚元特別研究員，積栄研究員，上園次郎氏には研究に多大な協力を頂きました。また，同センターにおける精密農業機械・装置の研究開発に関係する皆様，附属農場の皆様から，本研究への御助言，御協力を頂きました。ここに深く謝意を表します。

論文のとりまとめに当たり，東京農工大学大学院連合農学研究科　澁澤栄教授，同研究科の志賀徹教授，酒井憲司准教授，清水浩准教授，東城清秀准教授には，懇切な御指導，御助言を賜りました。東京農工大学の笹尾彰副学長からは，温かい御支援を賜りました。京都大学の加藤宏郎教授には，水分センサ開発にご助言を賜りました。心より謝意を表します。

収量測定機能付きコンバインの開発にあたって，株式会社ヤンマー，静岡製機株式会社，近江度量衡株式会社に御協力を頂きました。ここに深く謝意を表します。

本研究は，数え切れないほど多くの方々から大きな御協力を頂きました。御指導，御援助頂いた諸氏すべてを記載できない失礼をお詫び申し上げるとともに，ここに改めて深く謝意を表します。

引用文献

1) 牧野英二，林和信：北米におけ精密農業技術の調査－主として生育管理作業および収穫作業について，平成11年海外技術調査報告書，生研機構，35-42，2000
2) 後藤隆志，牧野英二，林和信：北米における精密農業技術の調査，生研機構海外調査報告書，1-78，2000
3) 帖佐直：自脱コンバイン用収量計測システムに関する研究，東京農工大学博士論文，1-155，2004
4) 農林水産省農産園芸局肥料機械化：21 世紀型農業機械等緊急開発事業について－環境保全と農業の体質強化等に向けた新たな機械の開発，1998
5) 鷹尾宏之進：21 世紀型緊急開発事業における精密圃場管理，農業機械学会シンポジウム「日本型プレシジョンファーミングを考える」講演資料，生研機構，9-21，1998
6) 牧野英二，杉山隆夫，市川友彦，浜田健二，川中道生：収量モニタリング機能付きコンバインの開発（第１報）-システムの基本設計および質量と水分の連続測定，農業機械学会誌，69(4),79-88，2007
7) 牧野英二，杉山隆夫，市川友彦，浜田健二，川中道生：収量モニタリング機能付きコンバインの開発（第２報）-測定システムとマップ作成，農業機械学会誌，69(5),89-94，2007
8) 牧野英二，杉山隆夫，市川友彦，浜田健二，川中道生：収量モニタリング機能付きコンバインの開発（第３報）-水稲および小麦の収穫情報測定とマップ，農業機械学会誌，69(5),95-103，2007
9) National Research Council : Precision agriculture in the 21st century, National Academy Press, 1-149, 1997
10) 澁澤栄：精密農業，初版，朝倉書店，1-191，2006
11) 農林水産省構造改善局：都道府県別の田畑整備状況，農用地建設業務統計，1995
12) 農林水産省構造改善局：都道府県別の田畑整備状況，農用地建設業務統計，2003
13) 農林水産省統計情報部：水稲作の農作業請負農家数、面積，平成 15 年農業構造動態調査報告書－基本構造－，2004
14) Pang,S.N., Zoerb,G.C. : A grain flow sensor for yield mapping, 1990 ASAE International Winter Meeting, Paper No.901633, 1990

15) 松井正実，井上英二，平井康丸，田代克己：脱穀制御のための穀粒流量センサに関する研究，農業機械学会第59回年次大会講演要旨．149-150，2000

16) 松井正実，井上英二，桑野朋子，田代克己：カウント式センサを用いた脱穀制御に関する研究，農業機械学会第60回年次大会講演要旨，53-54，2001

17) Matsui,M., Inoue,E., Kuwano,T., Hirai,Y., Hashiguchi,K., MORI,K. : Study on the counting sensor for threshing control, 農業機械学会誌, 64(5), 95-100, 2002

18) Christiansen,S.A., Kofoed,S.S. : A bin weigher for plot combines, Journal of Agricultural Engineering Research, 20(3), 335-338, 1975

19) Hooper,A.W., Ambler,B. : A combine harvester discharge meter, Journal of Agricultural Engineering Research, 24(1), 1-10, 1979

20) 建石邦夫，行本修，重田一人，黎文，小林恭，佐々木豊：高精度作物栽培管理のための収量マッピング技術の開発（第2報）－研究用バッチ式高精度収量計測システムの試作，農業機械学会第61回年次大会講演要旨，357-358，2002

21) 杉山隆夫，牧野英二，野口俊輔：インテリジェンスコンバインの開発，平成9年度生研機構事業報告，90-91，1998

22) 帖佐直，小林恭，大嶺政朗，柴田洋一.：収量計測コンバインに関する研究（第4報）－ロードセル荷重による収量計測－，農業機械学会第60回年次大会講演要旨，55-56，2001

23) Shearer,S.A., Watkins,G.A., Fulton,J.P., Higgins, S.F., McNeill,S.G., Barnhisel,R.I. : Data filtering and correction techniques for generating yield maps for multiple combine harvesting systems, 1997 ASAE Annual Meeting, No.971034, 1997

24) Kettle,L.Y., Peterson,C.L. : An evaluation of yield monitors and GPS systems on hillside combines operating on steep slopes in the Palouse, 1998 ASAE Annual International Meeting, Paper No.981046, 1998

25) Kormann,G., Demmel,M., Auernhammer,H. : Testing stand for yield measurement systems in combine harvesters, 1998 ASAE Annual International Meeting, Paper No.983102, 1998

26) Reitz,P., Kutzbach,H.D. : Investigation on a particular yield mapping system for combine harvesters, Computer and Electronics in Agriculture, 14, 137-150, 1996

27) Pfeiffer,D.W., Hummel,J.W., Miller,N.R. : Real-time corn yield sensor, 1993 ASAE International Summer Meeting, Paper No.931013, 1993

28) Borgelt,S.C., Sudduth,K.A. : Grain flow monitoring for in－field yield mapping, 1992 ASAE International Summer Meeting. Charlotte, Paper No.921022, 1992

29) Auernhammer,H., Demmel,M., Muhr,K., Rottmeier, J., Wild,K. : Yield measurements on combine harvesters, 1993 ASAE Winter Meeting, Paper No.931506, 1993

30) Peterson,C.L., Whitcraft,J.C., Hawley,K.N., Dowing,E.A. : Yield mapping winter wheat for improved crop management, 1989 ASAE International Summer Meeting, Paper No.897034, 1989

31) Chaplin,J., Hemming,N., Hetchler,B. : Comparison of impact plate and torque - based graom mass flow sensors, Transactions of the ASAE, 47(4), 1337-1345, 2004

32) Wagner,L.E., Schrock,M.D. : Yield determination using a pivoted auger flow sensor, Transactions of the ASAE, 32(2), 409-413, 1989

33) Howard,K.D., Pringle,J.L., Schrrock,M,D, Kuhlman,D.K., Oard,D.L., : An elevator based combine grain flow Sensor, 1993 ASAE International Winter Meeting, Paper No. 931504, 1993

34) Sanaei,A., Yule,I.J. : Yield measurement reliability on combine harvesters, 1996 ASAE Annual International Meeting, Paper No.961020, 1996

35) Vanacht,M. : The business of precision agriculture, on CD-ROM, 2001

36) Blackmore,B.S., Marshall,C.J. : Yield mapping ; errors and algorithm, 3rd International Conference on Precision Agriculture, 403-415, 1996

37) Birrell,S.J., Sudduth,K.A., Borgelt,S.C. : Comparison of sensors and techniques for crop yield mapping, Computers and Electronics in Agriculture, 14, 215-233, 1996

38) Jasa,P.J., Grisso,R.D., Wilcox,J.C. : Yield monitor accuracy at reduced flow rates, 2000 ASAE Annual International Meeting, Paper No.001085, 2000

39) Perez-Munoz,F., Colvin,T.S. : Continuous grain

yield monitoring, Transactions of the ASAE, 39(3), 775-783, 1996

40) Colvin,T.S., Arslan,S. : Yield monitor accuracy, Siteh - Specific Management Guidelines, Potash & Phosphate Institute, SSMG-9, 1999

41) Grisso,R.D., Jasa,P.J., Schroeder,M.A., Wilcox,J.C. : Yield monitor accuracy, successful farming magazine case swtudy, 1999 ASAE Annual International Meeting, Paper No.991047, 1999

42) Burks,T.F., Shearer,S.A., Fulton,J.P., Sobolik,C.J. : Influence of dynamically varying inflow rates on clean grain elevator yield monitor accuracy, 2001 ASAE Annual International Meeting, Paper No.011182, 2001

43) Beck,A., Roades,J., Searcy,S.W. : Post - processing filtering techniques to improve yield map accuracy, 1999 ASAE Annual International Meeting, Paper No.991048, 1999

44) O'Neal,M.R., Frankenberger,J.R., Parsons,S.D., Ess,D.R., Crisler,M.T., Strickland,R.M. : Correcting yield monitor data for improved yield mapping, 2000 ASAE Annual International Meeting, Paper No.001088, 2000

45) Snyder,C.J., BrittJr,J.C. : Yield mapping fundamentals and analysis, 1997 ASAE Annual International Meeting, Paper No.973018A, 1997

46) Bae,Y.H., Borglet,S.C., Searcy,S.W., Shueller,J.K., Stout,B.A. : Determination of spatially variable yield maps, 1987 ASAE International Winter Meeting, Paper No.871533, 1987

47) Searcy,S.W., Schueller,J.K., Bae,J.S.H., Borgelt,S.C., Stout,B.A. : Mapping of spatially - variable yield during grain combining, Transactions of the ASAE. 32(3), 826-829, 1989

48) Stott,B.L., Borgelt,S.C., Sudduth,K.A. : Yield determination using an instrumented claas combine, 1993 ASAE International Winter Meeting, Paper No.931507, 1993

49) Sudduth,K.A. : Engineering technologies for precision farming, International Seminar on Agricultural Machinery Technology for Precision Farming, 5-27, 1999

50) Al-Mahasneh,M.A., Colvin,T.S. : Verification of yield monitor performance for on - the - go measurement of yield with an in - board electronic scale, Transactions of the ASAE, 43(4), 801-807, 2000

51) Sudduth,K.A., Drummond,S.T., Wang,W., Krumpelman,M.J., Fraisse,C.W. : Ultrasonic and GPS measurement of combine swath width, 1998 ASAE Annual International Meeting, Paper No.983096, 1998

52) Han,S., Schneider,S.M., Evans,R.G., : A bitmap method for determing effective combine cut width in yield mapping, Transactions of the ASAE, 40(2), 485-490, 1997

53) Drummond,S.T., Fraisse,C.W., Sudduth,K.A. : Combine harvest area determination by vector processing of GPS position data, Transactions of the ASAE, 42(5), 1221-1228, 1999

54) Chosa,T., Kobayashi,K., Omine,M. : Yield - mapping algorithm for Head－feeding rice combine, 5th International Conference on Precision Agriculture, 2000

55) 庄司浩一，川村恒夫：水稲の収量マップの作成，農業機械学会誌，60(4)，73-74，1998

56) 李忠根，飯田訓久，下保敏和，梅田幹雄：実時間計測のための収量センサに関する基礎研究，農業機械学会第58回年次大会講演要旨，287-288，1999

57) 飯田訓久，下保敏和，姚勇，梅田幹雄，野波和好，錦織将浩：自脱コンバイン用収量モニターの開発研究（第1報）－ロードセル式モミ流量センサの試験，農業機械学会第61回年次大会講演要旨，371-372，2002

58) 牧野英二，杉山隆夫，市川友彦，北岸致，川中道夫，浜田健二，加藤宏郎：穀物収穫情報測定装置の開発（第1報）－試作機の構造と性能，農業機械学会第60回年次大会講演要旨，391-392，2001

59) 杉山隆夫，牧野英二，積栄：穀物収穫情報測定装置の開発，平成12年度生研機構事業報告，90-91，2001

60) 杉山隆夫，牧野英二，福田覚：インテリジェンスコンバインの開発，平成10年度生研機構事業報告，96-97，1999

61) 飯田訓久，姚勇，木村敦，錦織将浩，梅田幹雄：超音波センサによるグレーンタンク内の穀粒質量の推定，農業機械学会誌，68(2)，84-87，2006

62) Shoji,K., Kawamura,T., Horio,H. : Impact-based grain yield sensor with compensation for vibration and drift, 農業機械学会誌, 64(5), 108-115, 2002

63) 李忠根，飯田訓久，下保敏和，梅田幹雄：自脱コン

バインのためのインパクト式収量センサの開発，農業機械学会誌，62(4)，81-88，2000
64) Lee,C.K.：Mapping of field information and development of yield sensor for precision agriculture in paddy field, 京都大学博士論文, 2001
65) Chosa,T., Kobayashi,K., Omine,M., Shibata,Y.：Hybrid yield - monitoring system for head - feeding combine harvesters, 3rd European Conference on Precision Agriculture, 2001
66) 帖佐直，小林恭，大黒正道，柴田洋一，大嶺政朗.：自脱コンバイン用収量計測システムに関する研究（第1報）－光学式センサと重量式センサの収量モニタへの適用－，農業機械学会誌，64(6)，145-153，2002
67) 帖佐直，柴田洋一，大嶺政朗，鳥山和伸，荒木幹.：自脱コンバイン用収量計測システムに関する研究（第3報）－情報収集，解析，マップ作成の体系化－，農業機械学会誌，66(2)，137-144，2004
68)建石邦夫，小林恭，宮崎昌宏，齋藤秀文，関正裕，長坂善禎：大豆用収穫物モニタリング技術の開発（第3報）－収量センサの改良およびタンク内重量の推定方法－，農業環境工学関連7学会 2006 年合同大会講演要旨集(on CD-ROM)，2006
69) 李忠根：自脱コンバイン用収量モニタリングシステムの開発 1－穀物流量及び総量センサ開発，農業環境工学関連7学会 2006 年合同大会講演要旨集(on CD-ROM)，2006
70) 帖佐直，大嶺政朗，細川寿.：コンバインタンクにおける粒の拡散に関する研究（第1報）－コンバインタンク内の粒の拡散調査－，農業環境工学関連7学会 2006年合同大会講演要旨集(on CD-ROM)，2006
71) 庄司浩一，川村恒夫，堀尾尚志：移植田と散播田における水稲の収量マップの作成，　農業機械学会誌，62(2)，167-174，2000
72) 帖佐直，小林恭.：収量計測コンバインに関する研究（第2報）－コンバイン内の籾の搬送遅れ，還元について－，農業機械学会第 58 回年次大会講演要旨，97-98，1999
73) 帖佐直，柴田洋一，小林恭，大嶺政朗，大黒正道.：自脱コンバイン用収量計測システムに関する研究（第 2 報），農業機械学会誌，65(6)，192-199，2003
74) 飯田訓久，姚勇，梅田幹雄，大井戸直幸，野波和好，錦織将浩：コンバイン内部における穀粒の流れ計測（第2報），農業機械学会第 62 回年次大会講演要旨，471-472，2003
75) 小林一，三輪精博，渡辺隆：穀物流量計に関する基礎的研究，農業機械学会第 47 回年次大会講演要旨集，260，1988
76) Mailander,M.P., Schueller,J.K., Krutz,G.W.：An evaluation of four continuous moisture sensors on a combine, 1982 ASAE Winter Meeting, Paper No.821576, 1982
77) Brizgis,L.J., Nava,W.R., Paulsen,M.R.：Automatic sylinder speed control for combines, Transaction of the ASAE, 23(5), 1066-1071, 1075, 1980
78) Baskin,G.R., Mayeux,M.M., Sistler,F.E.：A monitor for crop moisture and combine cylinder speeds, Transactions of the ASAE, 25, 1220-1224, 1982
79) Prairie Agricultural Machinery Institute (PAMI). Evaluation Report 701: Calc - U - Dri Combine Moisture Meter, , 1993
80) Zoerb,G.C., Moore,G.A., Burrow,R.P.：Continuous measurement of moisture content during harvest, Transactions of the ASAE, 36(1), 5-9, 1993
81) McMahon,M., Jeffers,L.A., White,F.：Ex-situ grain moisture analyzer for a combine, United States Patent No.5616851, 1997-04-01
82) 伴敏三，鈴木光雄：人工乾燥における穀物含水率の電気的検出に関する研究，農業機械化研究所，研究所報告第 11 号，1977
83) 笠原正行，岩井昭衛，猪原明成：籾乾燥における粒別水分むらについて，農業機械学会第 37 回年次大会講演要旨集，1978
84) 杉山隆夫，牧野英二，野口俊輔：新収穫システムの開発に関する研究－多機能グレンタンクシステムの開発，平成 8 年度生研機構事業報告，生研機構，98-99，1997
85) 帖佐直，小林恭：収量計測コンバインに関する研究（第 3 報）－衝突版による穀粒流量計測にの精度向上について－，農業機械学会第 58 回年次大会講演要旨，99-100，1999
86) 加藤宏郎：高水分籾の高精度水分測定技術に関する基礎研究，生研機構，生研機構受託研究成果報告書，，1999
87) 加藤宏郎：高水分籾の高精度水分測定技術に関する基礎研究（Ⅱ），生研機構，生研機構受託研究成果報

告書，2000
88）加藤宏郎，杉山隆夫，牧野英二，市川友彦：高水分籾の高精度水分測定技術に関する基礎研究（第1報），農業機械学会誌，64(5)，68-75，2002
89）下原融：穀物水分の迅速計測法，農業機械学会誌，59(5)，123-126，1997
90）杉山隆夫，牧野英二：穀物収穫情報測定装置の開発，平成13年度生研機構事業報告，生研機構，74-75，2002
91）松尾陽介，濱田安之，津賀幸之助，山本聡史，行本修，野口伸：精密農業用作業ナビゲータ，農業機械学会第62回年次大会講演要旨，473-474，2003
92）石村貞夫：標本の大きさを決める，統計解析のはなし，東京図書，179-185，1989
93）Hemming,N., Chaplin,J.：Determining lag time for mass flow in a combine harvester, Transactions of the ASAE, 48(2), 823-829, 2005
94）江崎春雄：穀類収穫機（グレーンハーベスタ），イセブ，1986
95）Lems,J., Clay,D.E., Humburg,D., Doerge,T.A., Christopherson,S., Reese,C.L.：Yield monitors - Basic steps to ensure system accuracy and performance, Site - Specific Management Guidelines, Potash & Phosphate Institute, SSMG-31, 2000
96）CNH America LLC：Combine Productivity Guide, 2006
97）MICRO - TRACK Systems, inc.：GRAIN - TRACK User Manual (ver.2.2.00), 1997
98）林和信：大規模営農における作業履歴管理、生産物情報管理システムの管理，平成18年度海外技術調査報告書，生研センター，51-58，2007
99）Burks,T.F., Shearer,S.A., Sobolic,C., Fulton,J.P.：Combine yield monitor test facility development, 2000 Annual International Meeting, Paper No.001084, 2000
100）Loghavi,M., Ehsani,R.：Performance of a grain yield monitor: varying flow rate and ground slope using a test stand, 2004 ASAE Annual International Meeting, Paper No.041103, 2004
101）Arslan,S., Colvin,T.S.：Laboratory performance of a yield monitor, Applied Engineering in Agriculture, 15(3), 189-195, 1999
102）澁澤栄：わが国における精密農業の動向と展望，農林水産技術研究ジャーナル，30(5)，5-9，2007
103）西村洋：精密農業の水稲作への適応，農業機械学会誌，69(5)，4－7，2007
104）西村洋，堀尾光広，日高靖之，林和信，紺屋秀之，栗原英治，杉山隆夫，澁谷幸憲，市川友彦，内間亜希子，松尾陽介，濱田安之，小倉昭男，津賀幸之介：日本型水稲精密農業（PF）実証試験－実証試験の概要－，生研センター平成18年度研究報告会資料，2－4，2007
105）西村洋，堀尾光広，日高靖之，林和信，紺屋秀之，栗原英治，杉山隆夫，市川友彦，内間亜希子：日本型水稲精密農業（PF）実証試験－PF機器を活用した広域管理，生研センター平成18年度研究報告会資料，26－33，2007
106）澁谷幸憲，栗原英治，内間亜希子，杉山隆夫，市川友彦，砂田正史，上窪啓太：穀物収穫情報測定装置の開発促進評価試験，農業機械学会第63回年次大会講演要旨集，247-248，2004
107）日高靖之，栗原英治，杉山隆夫，牧野英二，澁谷幸憲，西村洋，林和信，内間亜希子，市川友彦：日本型水稲精密農業（PF）実証事業－収量コンバイン，生研センター平成18年度研究報告会資料，12-16，2007
108）日高靖之，栗原英治：収量コンバインによる収穫情報の取得とその利用，農業機械学会誌，69(5)，17-20，2007
109）濱田安之，松尾陽介，小倉昭男，津賀幸之介：日本型水稲精密農業実証試験－作業ナビゲータによる局所精密管理，生研センター平成18年度研究報告会資料，34-40，2007
110）新農業機械実用化促進株式会社．生体情報測定コンバインに関するニーズ調査－調査結果概要，生研センター委託調査事業報告，2005
111）Ashcroft,G.：Analysing maps enables precise fertiliser spread, FARMERS WEEKLY, 23 Feburary, 74-78, 2007
112）山田竜雄，佐藤常雄，徳永光俊ほか編：日本農書全集，農山漁村文化協会，1980-2001
113）守田志郎：農業にとって技術とはなにか，農山漁村文化協会，1994
114）山岸順子：圃場管理，環境保全型農業事典，丸善株式会社，380-381，2005
115）Krumpelman,M.J., Sudduth,K.A.：Design and analysis of a grain weighing system, 2000 ASAE Annual International Meeting, Paper No.001126, 2000

116) Wagner,L.E., Schrock,M.D. : Grain flow measurement with a pivoted auger, 1986 ASAE Winter Meeting, Paper No.861581, 1986

117) Pringle,J.L., Schrock,M.D., Hinnen,R.T., Howard, K.D., Oard,D.L. : Yield variation in grain crops, 1993 ASAE Internationla Winter Meeting, Paper No.931505, 1993

118) 杉山隆夫，牧野英二，野口俊輔：新収穫システムの開発に関する研究－多機能グレンタンクシステムの開発，平成 7 年度生研機構事業報告，生研機構，96-97，1996

119) Minzan,L., Liu,G., Man,Z., Maohua,W. : Development of a new grain yield monitor system, 2005 First Asian Conference on Precision Agriculture (FACPA), 65-70, 2005

120) 庄司浩一，川村恒夫：水田の収量マップの作成，農業機械学会第 57 回年次大会講演要旨集，95-96，1998

121) 建石邦夫，宮崎昌宏，齋藤秀文：大豆用収穫物モニタリング技術の開発（第 2 報）－流量センサの特性と収量計測精度－，農業環境工学関連 7 学会 2005 年合同大会講演要旨，273，2005

122) 飯田訓久，姚勇，梅田幹雄，大井戸直幸，野波和好，錦織将浩：自脱コンバイン用収量モニターの開発研究（第 2 報）－収量モニターの概要－，農業機械学会第 62 回年次大会講演要旨，467-468，2003

123) 飯田訓久，姚勇，梅田幹雄，大井戸直幸，野波和好，錦織将浩：自脱コンバイン用収量モニターの開発研究（第 3 報）－時間遅れと分配率の補正－，農業機械学会第 62 回年次大会講演要旨，469-470，2003

124) Iida,M., Yao,Y., Kimura,A., Umeda,M. : Development of grain yield monitor for head-feeding combines, 2005 ASAE Annual International Meeting, Paper No.051136, 2005

125) 三輪精博，渡辺隆，後藤清和：穀物流量計に関する基礎的研究（II），農業機械学会第 49 回年次大会講演要旨集，357-358，1990

126) 帖佐直，小林恭，大黒正道，細川寿，大嶺政朗.：普通型コンバイン用収量モニタの自脱型コンバインへの適用，農業機械学会関東支部第 36 回年次大会講演要旨集，2000

127) 李忠根，飯田訓久，梅田幹雄，下保敏和：水田におけるモミとワラの収量マップ，農業機械学会誌，61(4)，133-140，1999

128) 李忠根，下保敏和，飯田訓久，梅田幹雄：インパクト式収量センサに関する基礎研究（第 2 報），農業機械学会第 59 回年次大会講演要旨，331-332，2000

129) 建石邦夫，金谷豊，佐々木豊，小林恭：高精度作物栽培管理のための収量マッピング技術の開発－収量コンバインの試作とその性能，農業機械学会第 58 回年次大会講演要旨，283-284，1999

130) 原令幸，竹中秀行，関口健二：小麦収量マップ作成のためのデータ収集と補正－作業経路からの刈幅補正－，農業機械学会第 59 回年次大会講演要旨，367-368，2000

131) Kuhar,J.E. : The Precision-farming Guide for Agriculturists, John Deere Publishing, 1997

132) 下保敏和，飯田訓久，梅田幹雄，李忠根：運搬車のための積載量計測装置，農業機械学会誌，64(3)，109-114，2002

Summary

Development of Yield-monitoring Combine Harvester

Eiji MAKINO, Takao SUGIYAMA, Tomohiko ICHIKAWA,
Kenji HAMADA, Michio KAWANAKA

When harvesting cereals such as rice and wheat, the following factors are important : namely, the yield which indicates the production for that crop year, moisture content which is an index of maturity at harvest time, as well as other forms of harvest-related information. This information reflects the results of cultivation management policies and practices at the crop year, and is indispensable when setting cultivation management policies for succeeding years.

However, a farmer tends to give greater priority to harvesting efficiency than information collection, because harvesting operations are greatly influenced by crop conditions and weather. Consequently, it is difficult to obtain objective information on yield, moisture content, etc. of a particular field during an actual harvest work. Thus, collected information tends to rely on the memory of the farmer.

Moreover, latest Japanese agricultural production circumstances show that memory and experience-oriented information is inadequate, and that objective as well as accurate harvest information is required. Reasons for growing demands on such value-added information include an increase in the number of large-scale paddy fields, implementation of high quality production plans, optimization of operations and the increased use of contract labor during harvesting.

A greater focus in nowadays on precision agricultural technology systems, in which information on field harvest levels, moisture content and other data is indispensable. Thus efficient methods to record objective and detailed harvest information are even more desirable.

In Europe and North America, yield sensors and moisture sensors are commonly used, and such sensors are installed on most of the large conventional combine harvesters. However, as noted by Makino and Hayashi (2000), Gotoh et al. (2000) and Chosa (2004), in contrast to the large, conventional combine harvesters used in Europe and the US, compact, structurally different, head-feeding combine harvesters are widely used in Japan, and it is difficult to equip these harvesters with the same types of sensors used in the US and Europe.

One reason for that is smaller grain flow through Japanese-style head-feeding

combines compared to conventional combine harvesters used in the US and Europe. Additionally, it is noted that measurement error rates of US and European sensors during low grain flow harvesting is high, and that durability of such sensors is poor when applied to rice paddy (Gotoh et al., 2000).

Furthermore, nature of grain harvest in Japan, which requires higher moisture contents than in the US and Europe, differences in measurement methods, differences in instrument installation locations, various field conditions, and the difference in target crops themselves. The direct use of US and European technology is impractical.

Previously in Japan, a great deal of research and development was conducted on harvest information measurement. However, almost all such research rather focused on measurement of harvested grain mass, and the development of sensors capable of continuous measurement of moisture content during harvest operations was neglected. Furthermore, with regards to the yield sensors themselves, although some were developed for research purposes, they were considered impractical for use of commercial farmers from the standpoints of measurement accuracy and ease of operation.

Thus, in this study, we decided to develop a combine harvester capable of simultaneous measurement, display and record of the amount of harvested grain as well as the moisture content of the grain and other vital information, during actual harvest operations.

1. Basic Design and Trial Manufacture of Prototype Yield-monitoring Combine Harvester

After conducting a fundamental evaluation of the required measurement accuracy, work on the basic design of the prototype machine and each measurement system was conducted. Then, technical development of the components needed for an electrical resistance moisture sensor that was capable of making continuous measurement was performed. The development of the electrical resistance moisture sensor is also focusing on suitability for installation on a head-feeding combine harvester. Finally, a prototype combine harvester was constructed based on this study.

1) The yield and moisture of paddy rice at harvest time was investigated and, based on the studied accuracy required for the yield measurement capability of an equipped combine, a target of a mass measurement error was set. The targeted tolerance was within 5% when harvesting a block greater than 1 are. Furthermore, a moisture measurement range of 15~35% was set, and its measurement accuracy is 1%, as for predicted measurement error.
2) The prototype development machine was a head-feeding combine harvester. It was equipped with a mass measurement device, a moisture measurement device, a position information device and a control and display device. The mass measurement device

consisted of a load cell supporting one end of the combine tank, and an inclination sensor was installed near the load cell. The load cell is capable of measuring the total mass of grain in the tank. Moisture measurement was performed by multiple grain type electrical resistance moisture sensor. By the developed moisture measurement device, sampling and measurement was done immediately after spreading grain kernels inside the tank. The position information measurement device and the control and display device were using simplified methods without GPS in this study, but the GPS-based PF Navigator developed in BRAIN (IAM) is also available.

3) Additionally, a new moisture roller electrode was developed for the moisture measurement device, for which use of the calibration curves from conventional single grain electrical-resistance moisture sensors was made possible. In laboratory tests, the results of measurement accuracy using high moisture content unhulled rice gave a value for standard error prediction (SEP) at 0.55. The value for measurement of high moisture content unhulled rice, of about 30% and even higher, was not saturated, nor fluctuated, and with very good accuracy.

4) Based on the studied fundamental design specifications, a prototype of yield-monitoring combine harvester was manufactured and continuous measurements of mass, moisture and position data were made during actual harvest operations.

2. Development of Measurement System

System development of measurement accuracy for the yield-monitoring combine harvester includes consideration of time-lag correction methods, inclination correction of the load cell output for the mass measurement device, as well as calibration curve creation and confirmation of the accuracy of simple position measurements without using GPS.

1) With regards to time delay, measurement was done to find out the time difference between the point the harvesting sensor was turned on/off and the points at which the output from the mass measurement and moisture sensor show changes. As a result obtained time lag was about 15 seconds for both. In this study, a complicated correction for time lag was not conducted, and, as a practical method for data processing, the time lag was assumed to be uniform during data processing. The mode value and observation results for measurement data from the mass sensor and moisture sensor units were similar. As a result, the assumed time lag was set at 15.0 seconds.

2) For the mass measurement device, inclination correction using an inclination sensor installed near the load cell was found to improve measurement accuracy. Actual harvesting was conducted and the calibration formula for the mass measurement device was obtained. The results showed that, for both paddy rice and wheat, an $R>0.99$ calibration curve was possible.

3) The position measurement device was able to determine position within an error range of less than one meter during actual harvest operation.

4) Wheat harvest work was done using the prototype yield monitoring combine harvester. Mass maps, moisture maps, and yield per-10a maps, were thereby made easily.

3. Verification of Performance of Developed System

In order to verify the performance of the prototype yield monitoring combine harvester, the measurement accuracy of the mass measurement device and moisture measurement device were tested. Particular attention was paid to the mass measurement device. The test was conducted over the harvest of whole paddy fields, the harvest of small block mesh areas, and harvesting at various grain flow rates. Furthermore, a full set of harvest operations was conducted and the maps produced by the mapping system were considered. The characteristics and technical development issues for the yield monitoring combine harvester were then reviewed based on the verification test results of each system.

1) The mass measurement device for wheat and paddy rice harvesting recorded a measurement error of 5% and under for 90% of the test blocks (maximum 8% and under) and achieved its targeted level of measurement accuracy. Measurement accuracy was high regardless of the operating speed. Furthermore, regardless of harvesting method, the measurement accuracy for each field was high. Small block mesh measurements for wheat and paddy rice were both within about 3 kg and showed high accuracy.
2) The moisture measurement device for paddy rice had a coefficient of correlation r=0.99 and a standard error of prediction SEP=0.98. For wheat, r= 0.98 and SEP=1.28 were achieved without any influence by operating speed or variety.
3) For harvesting operations with headland turning in the field, maps were easily created. Furthermore, simultaneous analysis of three map types, namely, harvest mass maps, moisture maps and moisture 15% conversion yield per-10a maps, was made possible to allow appropriate assessment of cultivated fields.

Tech. Rep., Inst. of Agric. Mach. No. 37 : 1-59 (2009)